

Проектирование СКВ.
Алгоритм расчета теплообмена при
свободном потоке.

Инженер Андониев И.Ю.

Нижний Новгород
2017

Содержание

	Лист
1. Введение.....	2
2. Основные условные обозначения	3
3. Воздух, справочные данные	4
4. Конвективный теплообмен	4
5. Теория подобия	5
6. Экспериментальное изучение конвективного теплообмена	9
7. Теплоотдача вертикальных и горизонтальных поверхностей при свободном потоке ..	10
8. Сравнение критериальных уравнений	11
9. Решение задач	15
10. Сложный теплообмен	19
11. Алгоритм расчета теплообмена при свободном потоке	24
12. Литература	27

1. Введение.

Системы вентиляции и кондиционирования воздуха (СКВ), как правило работают в условиях, которые характеризуются следующими параметрами :

- а) низкие тепловые напоры, это определяется климатическими условиями: холодный период $t_{\min} = -30^{\circ}\text{C}$, теплый период $t_{\max} = +30^{\circ}\text{C}$;
- б) небольшой диапазон комфортных температур в обитаемых помещениях $18^{\circ}\text{C}...25^{\circ}\text{C}$;
- в) небольшой диапазон температур кондиционирования воздуха $15^{\circ}\text{C}...30^{\circ}\text{C}$;
- г) отсутствие высоких тепловых излучений, в помещениях нет высоконагретых поверхностей, а если есть, то они имеют тепловую изоляцию с температурой поверхности не превышающей $+100^{\circ}\text{C}$.

В практике проектирования систем вентиляции и кондиционирования воздуха встречаются объекты, где находится оборудование имеющее нагретые поверхности: кухни, прачечные, экструдерные цеха, пультовые, где находятся шкафы управления, телефонные станции, цех для хранения жира при производстве маргарина и т.д. Для подобных случаев нужен короткий, ясный и достаточно универсальный расчет. Для его создания пришлось пересмотреть множество книг по теплопередаче и на этой основе составить алгоритм расчета, который можно легко реализовать на компьютере в электронных таблица Excel. Это расчет именно для вычисления теплопритоков исходящих от нагретых поверхностей внутри помещений.

Для расчета нужны измерительные приборы, я использовал: психрометр Ассмана, термопсихрометр Т-250. Многоцелевой термопсихрометр Т-250 измеряет дистанционно температуру в 4-х различных пунктах, а также в одном пункте влажность воздуха. Диапазон измеряемых температур то -40° до 150°C . В комплект входят датчики: общего назначения (штифты $\varnothing 6\text{мм}$), поверхностные (таблетки), воздушный, влажностный. Приезжая на объект я проводил измерения, затем на фирме выполнял расчеты и приступал к проектированию. При этом появилась уверенность в своих расчетах, исчезли сомнения.

2. Основные условные обозначения .

$g = 9,81 \text{ м/с}^2$ - ускорение свободного падения ;
 $T = 273,15^\circ\text{С}$ - температура Кельвина при 0°С ;
 $m_v = 28,96 \text{ кг/кмоль}$ - молекулярная масса воздуха ;
 $R = 8314,3 \text{ Дж/(кмольК)}$ - универсальная газовая постоянная ;
 $g_v = 287,04 \text{ Дж/(кг}^\circ\text{С)}$ - газовая постоянная воздуха ;
 $\rho_v, \text{ кг/м}^3$ - плотность воздуха ;
 $c_0 = 5,67$ - коэффициент излучения абсолютно черного тела ;
 ε - степень черноты стенки ;
 $\lambda_v, \text{ Вт/(мК)}$ - теплопроводность воздуха ;
 $\nu_v, \text{ Вт/(мК)}$ - кинематическая вязкость воздуха ;
 $d, \text{ м}$ - диаметр сечения ;
 $a, b, \text{ м}$ - размеры сечения ;
 $l, \text{ м}$ - длина ;
 $x, \text{ м}$ - характерный размер ;
 $t_v, ^\circ\text{С}$ - температура воздуха ;
 $t_{ст}, ^\circ\text{С}$ - температура стенки ;
 $\alpha, \text{ Вт/(м}^2\text{К)}$ - коэффициент теплоотдачи ;

3. Воздух, справочные данные .

Свойства воздуха, которые необходимы при тепловых расчетах :

Ускорение свободного падения	$g = 9,81 \text{ м/с}^2$;
Температура Кельвина при 0°C	$T = 273,15^\circ\text{C}$;
Молекулярная масса воздуха	$m_v = 28,96 \text{ кг/кмоль}$;
Универсальная газовая постоянная	$R = 8314,3 \text{ Дж/(кмольК)}$;
Газовая постоянная воздуха	$r_v = 287,04 \text{ Дж/(кг}^\circ\text{C)}$.

Плотность воздуха, коэффициенты теплопроводности и кинематической вязкости воздуха аппроксимированны в функции по температуре , в диапазоне -50°C до 400°C .

Плотность воздуха

$$\rho_g = f(t_g, P_a)$$

P_a - атмосферное давление, Па

$$\rho_g = \frac{P_a}{r_v \cdot (t_g + 273,15)}$$

r_v - газовая постоянная воздуха, Дж/(кг $^\circ\text{C}$)

Коэффициент теплопроводности

$$\lambda_g = f(t_g)$$

$$\lambda_g = -0,235 \cdot 10^{-7} \cdot t_g^2 + 0,812812 \cdot 10^{-4} \cdot t_g + 0,024289$$

Коэффициент кинематической вязкости

$$\nu_g = f(t_g)$$

$$\nu_g = 0,127 \cdot 10^{-9} \cdot t_g^2 + 0,124 \cdot 10^{-6} \cdot t_g + 0,19 \cdot 10^{-4}$$

4. Конвективный теплообмен .

Конвекция - процесс распространения теплоты путем перемещения жидкости или газа в пространстве из области с одной температурой в область с другой температурой. Конвекция может происходить только в жидкостях или газах и обуславливается перемещением самой среды. Конвекция всегда сопровождается теплопроводностью, т.к. при перемещении жидкости или газа отдельные частицы имеющие разные температуры всегда соприкасаются. Одновременное распространение теплоты конвекцией и теплопроводностью носит название конвективного теплообмена. Конвекция свободная - движение потока обуславливается только условиями нагрева (температурным полем) в следствии различных плотностей - теплообмен в свободном потоке. Конвекция вынужденная - движение потока вызвано механизмом (вентилятор, компрессор...) - конвективный теплообмен в вынужденном потоке. Конвективный теплообмен зависит от распределения температур в потоке, скоростей, режима течения. Различают два режима течения жидкости и газа. Ламинарный - отдельные струйки перемещаясь не смешиваются. Турбулентный - каждая частица потока, участвуя в общем поступательном движении, совершает различные поперечные движения . Основное уравнение конвективного обмена :

$$\Phi = \alpha A(t - t_{ст}) \text{ или } \Phi = \alpha A \Delta t - \text{формула Ньютона, где}$$

α - коэффициент теплоотдачи, характеризует интенсивность теплоотдачи ;

A - площадь поверхности теплообмена ;

t - температура жидкости или газа ;

$t_{ст}$ - температура стенки ;

$\Delta t = (t - t_{ст})$ - температурный напор .

В отличие от λ α не постоянная величина, а зависит от большого числа различных факторов: причина движения, режим течения, форма и размеры тела, теплофизические свойства жидкости, скорость и направление потока, наличия фазовых переходов...

Тепловой поток может быть определен после того, как найден α .

$$\alpha = f(t_{ст}, t, \rho, v, \lambda, c_p, w, F_t, l, x)$$

F_t - форма тела;

l - геометрические размеры тела;

x - характер движения жидкости.

В каждом конкретном случае α рассчитывается с помощью уравнений подобия, которые получают или по результатам экспериментов, или по результатам математического моделирования данного процесса. В последнем случае при создании математической модели используют системы дифференциальных уравнений конвективного теплообмена в которую входят: уравнения энергии, движения, сплошности... Эта система описывает целый класс явлений и имеет множество решений. Чтобы выделить конкретное решение, система дополняется условиями однозначности, которые должны содержать все особенности конкретного случая.

Условия однозначности:

- а) геометрические условия т.е. форма, размеры поверхности омываемой жидкостью;
- б) временные условия - особенности протекания процесса во времени (для стационарного режима временное условие пропадает);
- в) граничные условия - протекание процесса на границах тела;
- г) физические условия - физические свойства среды и тела, например: $\lambda, \rho, v...$

Полученная система неинтегрируема без существенных упрощений. Большинство технических задач решается на основе экспериментальных данных. Для возможности обобщения таких данных и выявления границ их применения эксперимент строится на теории подобия.

5. Теория подобия.

5.1. Теория подобия позволяет не интегрируя систему дифференциальных уравнений конвективного теплообмена научно обрабатывать результаты экспериментов **и решать практические задачи**. Теория подобия является теорией эксперимента, при проведении эксперимента необходимо знать:

- а) какие величины измерять;
- б) как обрабатывать результаты;
- в) на какие явления можно распространять полученные результаты.

5.2. Три теоремы подобия.

Константы подобия - критерии, числа. У геометрически подобных фигур сходственные стороны пропорциональны. Коэффициенты пропорциональности и есть константа подобия. Константы подобия не могут выбираться произвольно. Если явления подобны, то между константами есть определенные зависимости отражающие законы природы.

Теорема 1: у подобных явлений одноименные критерии (числа) одинаковы. Критерии подобия имеют определенный физический смысл.

Теорема 2: решение системы уравнений конвективного теплообмена т.е. интеграл этих уравнений, может быть представлено, как функция критериев подобия.

Теорема 3: у всех явлений, относящихся к данной группе, условия однозначности подобны. В пределах группы различие в условиях однозначности заключается лишь в неодинаковости масштабов констант подобия. $U_i'' = C_i U_i'$, где

U_i' - величина входящая в условие однозначности 1 явления;

U_i'' - одноименная величина, входящая в условия однозначности 2 явления;

C_i - константа подобия.

Смысл теоремы 3 - подобны те явления, условия однозначности которых подобны, критерии подобия составленные из этих условий, равны.

5.3. Правила проведения эксперимента по академику М .А. Михееву, [9].

- 1) В опытах измерять те величины , которые содержатся в критериях подобия данного явления (теорема 1).
- 2) Результаты опытов обрабатывать в критериях подобия и зависимость между ними представлять в виде критериальных уравнений подобия (теорема 2).
- 3) Обобщенные критериальные зависимости можно распространять на все явления подобные данному (теорема 3).

π - теорема: число безразмерных комплексов характеризующих процесс равно числу всех физических величин существенных для процесса , минус число основных размерностей . В теории теплопередачи число основных размерностей равно 4: длина, температура, время, масса.

5.4. Типы подобия. Числа подобия.

5.4.1. Гидродинамическое подобие обуславливается равенством следующих чисел : Eu ; Ho ; Fr ; Re .

- а) Число Эйлера Eu , является мерой отношения перепада статических давлений в потоке жидкости к динамическому напору потока .
- б) Число гомохромности Ho , характеризует неустановившиеся процессы .
- в) Число Фруда Fr , является мерой отношения силы тяжести к инерционной силе , пропорциональной скорости потока .
- г) Число Рейнольдса Re , является мерой отношения динамического давления к давлению силы вязкого трения . Определяет режим течения потока .

В гидродинамически подобных системах в любых сходственных точках числа Ho , Fr , Eu , Re имеют одинаковые значения . Eu - определяемый критерий, Ho , Fr , Re -определяющие критерии. В общем случае: $Eu = f(Ho, Fr, Re)$.

Ограничения.

- 1) Стационарный вынужденный поток $Eu = f(Re)$.
- 2) Нестационарный вынужденный поток $Eu = f(Ho, Re)$, число Fr исключается в связи с весьма малым влиянием силы тяжести на поле скоростей и давлений .
- 3) В свободном потоке при естественной конвекции число Fr преобразуется к другому виду т.к. движение определяется разностью плотностей $\Delta\rho$.
Число Грасгофа Gr - является мерой отношения подъемной силы , возникающей вследствие разности плотностей жидкости к силе вязкого трения .

5.4.2. Тепловое подобие обуславливается равенством следующих чисел : Fo , Pe , Nu , St , Pr .

- а) Число Фурье Fo является безразмерным временем и выражает соответствие между темпом изменения условий в окружающей среде и темпом перестройки температурного поля внутри тела .
- б) Число Пекле Pe - критерий подобия температурных полей , мера отношения молекулярного и конвективного переноса тепла в потоке . Мера отношения интенсивности конвективного переноса тепла к интенсивности переноса тепла теплопроводностью .
- в) **Число Нусельта Nu** представляет собой безразмерный коэффициент теплоотдачи , оно характеризует собой интенсивность теплообмена на границе твердое тело - жидкость .

В общем случае уравнение конвективного теплообмена описывается уравнением

$$Nu = f(Fo, Pe)$$

- г) Число Стентона St характеризует меру отношения интенсивности теплоотдачи к интенсивности конвективного переноса теплоты в жидкости при условии изменения ее температуры от $t_{ж}$ до $t_{ст}$.

Числа подобия

Число Эйлера

$$Eu = \frac{\Delta P}{\rho \cdot w^2}$$

ΔP - перепад давлений

Число гомохромности

$$Ho = \frac{w \cdot \tau}{l}$$

τ - время

Число Фруда

$$Fr = \frac{g \cdot l}{w^2}$$

Число Рейнольдса

$$Re = \frac{w \cdot l}{\nu}$$

l - определяющий размер

ν - кинематическая вязкость

Число Грасгофа

$$Gr = Fr \cdot Re^2 \cdot \frac{\rho_o - \rho}{\rho} = \beta \cdot \frac{g \cdot l^3}{\nu^2} \cdot \Delta t$$

$$\beta_{жс} = \frac{1}{t_{жс} + 273} \text{ - коэф. объемного расширения}$$

Число Фурье

$$Fo = \frac{a \cdot \tau}{l^2}$$

$$a = \frac{\lambda}{c \cdot \rho} \text{ - температуропроводность}$$

Число Пекле

$$Pe = \frac{w \cdot l}{a} = Re \cdot Pr$$

Число Нусельта

$$Nu = \frac{\alpha \cdot l}{\lambda}$$

Число Стентона

$$St = \frac{Nu}{Pe} = \frac{\alpha}{\rho \cdot w \cdot c_p}$$

α - коэф теплоотдачи

c_p - теплоемкость при $P=\text{const}$

ρ - плотность теплоносителя

w - скорость теплоносителя

Число Прандтля

$$Pr = \frac{Pe}{Re} = \frac{\nu}{a}$$

$Pr = 0.66$ одноатомные газы

$Pr = 0.71$ двухатомные газы **и ВОЗДУХ**

$Pr = 0.84$ трехатомные газы

$Pr = 1$ многоатомные газы

Для капелных жидкостей $Pr > 1$ и является функцией температуры.

5.5. Уравнения подобия конвективного теплообмена .

1) Вобщей форме:

$$Nu = f(Ho, Gr, Re, Fo, Pe, l/l_0).$$

Ho и Fo - определяющие критерии для нестационарных процессов ,
 l/l_0 - симплекс, отношение линейных размеров тела .

2) Для стационарных процессов

$Nu = f(Gr, Re, Pe, l/l_0)$ т.к. $Pe = RePr$ то

$$Nu = f(Gr, Re, Pr, l/l_0).$$

3) Вынужденный турбулентный поток (можно не учитывать влияние естественной конвекции т.е. $Gr = 0$).

$$Nu = f(Re, Pr, l/l_0).$$

4) При свободном движении не учитывают Re , т.е. вынужденная конвекция отсутствует

$$Nu = f(Gr, Pr, l/l_0).$$

6. Экспериментальное изучение конвективного теплообмена .

6.1. Для определения коэффициента теплоотдачи часто используют метод стационарного теплового потока .

$$\alpha = \frac{\Phi}{(t_{cm} - t) \cdot A} = \frac{q}{\Delta t}$$

Измеряют тепловой поток Φ , температуру стенки твердого тела $t_{ст}$ и температуру жидкости t_k . Способы подвода теплоты к исследуемой жидкости могут быть разными: с помощью электронагревателя, пропусканием через поверхность нагрева постоянного тока низкого напряжения, паром и т.д. Температуру стенки через которую передается теплота измеряют термомпарами в нескольких точках поверхности нагрева. За расчетное значение принимают среднее арифметическое значение -

$$t_{cm} = \frac{\sum t_i}{i}$$

6.2. Определение температуры и скорости потока жидкости .

В потоке жидкости при теплообмене всегда неравномерное распределение температур , как по сечению так и по длине канала .

1) Средняя арифметическая температура потока

$$t_n = \frac{t' + t''}{2} \quad t' - \text{на входе, } t'' - \text{на выходе.}$$

2) Среднелогарифмическая $t_n = t_{cm} \pm \Delta t_{cp}$

"+" - при охлаждении; "-" - при нагревании жидкости.

$$\Delta t_{cp} = \frac{(t' - t'')}{\ln \frac{t' - t_{cm}}{t'' - t_{cm}}}$$

если $\frac{t' - t_{cm}}{t'' - t_{cm}} \leq 1,7$ то принимают $t_n = \frac{t' + t''}{2}$

6.3. Обобщение результатов опыта .

Опыт показывает, что зависимость между числами подобия , в определенных пределах изменения аргумента, обычно может быть представлена в виде степенных функций .

1) Для вынужденного потока

$$Nu = C \cdot Re^n \cdot Pr^m \quad \text{с, n, m - найденные из опыта}$$

2) Для газов при вынужденном потоке

$$Pr = const, Nu = C \cdot Re^n$$

Различие в методах определения осредненных физических параметров и температуры жидкости приводит к тому, что на основе одних и тех же опытов разные исследования получают разные формулы, (и не много разные результаты). поэтому следует обращать внимание на индексы чисел подобия: $Re_{пот}$, $Pr_{ст}$, $Pr_{пот}$... Влияние переменности физических параметров на теплообмен учесть очень трудно. В инженерных расчетах, при умеренном диапазоне изменения физических параметров, пользуются теми же уравнениями, что и при постоянстве физических параметров, но с введением поправок.

а) Все физические параметры определяют при $t_{пот}$, а влияние переменности физических величин учитывают коэффициентами: $Pr_{пот}/Pr_{ст}$; $\nu_{пот}/\nu_{ст}$ ($t_{пот}/t_{ст}$).

б) Во многие числа подобия входит линейная величина l или d . За определяющий размер берут тот, от которого в большей степени зависит процесс конвективного теплообмена, остальные размеры входят в уравнения в виде симплексов: l_1/l ; l_2/l ...

в) При поперечном омывании гладких труб определяющий размер d_n - наружный диаметр трубы.

г) При течении жидкости в трубах - внутренний диаметр d_v .

д) При движении жидкости в трубах или каналах разной формы, за определяющий размер принимают эквивалентный диаметр $d_э = 4A/\Pi$, A - площадь сечения канала, Π - периметр сечения канала, через который происходит теплопередача.

Это приближенный метод, но он дает удовлетворительные результаты в следующих случаях расчета теплопередачи:

1) в каналах прямоугольного сечения;

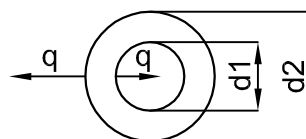
2) в каналах треугольного сечения;

3) при продольном омывании пучка труб в случаях турбулентного режима:

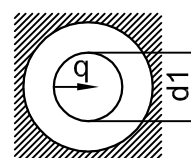
- для прямоугольного сечения $d_э = 2ab/(a+b)$;

- для кольцевого сечения через две поверхности, внутреннюю и наружную $d_э = d_1 + d_2$;

$$d_э = d_1 + d_2$$



$$d_э = \frac{d_2^2 - d_1^2}{d_1}$$



При течении потока вдоль пучка труб расположенного в канале прямоугольного сечения со сторонами "а" и "в" при передаче тепла только трубам эквивалентный диаметр определяется по формуле, где n - число труб:

$$d_э = \frac{4 \cdot a \cdot b}{n \cdot \pi \cdot d_n} - d_n$$

7. Теплоотдача вертикальных и горизонтальных плоскостей .

7.1. Теплоотдача при свободном движении .

7.1.1 Вертикальные поверхности.

В нижней части нагретой вертикальной поверхности устанавливается ламинарный режим движения жидкости. Переход от ламинарного режима к турбулентному происходит на некотором расстоянии l_k , для воздуха

$$l_k = 1.89 \cdot \Delta t \left(\frac{l}{3} \right)$$

Условие ламинарного режима при свободном движении жидкости вдоль вертикальной поверхности трубы или пластины :

Ламинарный режим

$$10^3 < (Gr \cdot Pr)_{nom} < 10^9$$

$$Nu_{nom} = 0.76 \cdot (Gr \cdot Pr)_{nom}^{0.25} \cdot \left(\frac{Pr_{nom}}{Pr_{cm}} \right)^{0.25}$$

Турбулентный режим

$$(Gr \cdot Pr)_{nom} \geq 10^9$$

$$Nu_{nom} = 0.15 \cdot (Gr \cdot Pr)_{nom}^{0.33} \cdot \left(\frac{Pr_{nom}}{Pr_{cm}} \right)^{0.25}$$

Для воздуха или двух атомного газа

$$Pr=0.71; \frac{Pr_{nom}}{Pr_{cm}} = 1$$

$$\text{Ламинарный режим } Nu_{nom} = 0.7 \cdot Gr_{nom}^{0.25}$$

$$\text{Турбулентный режим } Nu_{nom} = 0.132 \cdot Gr_{nom}^{0.33}$$

7.1.2. Горизонтальная плита.

Для расчета используется зависимость для вертикальных поверхностей , но при этом: плита обращена теплоотдающей поверхностью вниз :

$$\alpha_{г.вниз} = 0,7 \cdot \alpha_{верт}$$

плита обращена теплоотдающей поверхностью вверх:

$$\alpha_{г.вверх} = 1,3 \cdot \alpha_{верт}$$

В качестве определяющего линейного размера принимается длина меньшей стороны плиты.

8. Сравнение критериальных уравнений конвективного теплообмена у разных авторов .

Естественная конвекция. Теплоотдача в свободном потоке . Среда: жидкость, воздух. Тела: труба, стенка, плита. Расположение: вертикально, горизонтально.

Уравнение теплообмена в общем виде - $Nu = f(Gr, Pr, l/l_0)$.

8.1. В.М.Селиверстов, [1].

Труба, плита, вертикально, определяющий размер h:

Жидкость

$$10^3 < (Gr \cdot Pr)_n < 10^9$$

$$Nu_n = 0.76 \cdot (Gr \cdot Pr)^{0.25} \cdot \left(\frac{Pr_n}{Pr_{cm}} \right)^{0.25}$$

$$10^9 \leq (Gr \cdot Pr)_n \quad Nu_n = 0.15 \cdot (Gr \cdot Pr)_n^{0.33} \cdot \left(\frac{Pr_n}{Pr_{cm}} \right)^{0.25}$$

Воздух

$$10^3 < (Gr \cdot Pr)_n < 10^9 \quad Nu_n = 0.7 \cdot Gr_n^{0.25}$$

$$10^9 \leq (Gr \cdot Pr)_n \quad Nu_n = 0.132 \cdot Gr_n^{0.33}$$

Жидкость, труба горизонтальная

$$10^3 < (Gr \cdot Pr)_n < 10^9 \quad Nu_n = 0.5 \cdot (Gr \cdot Pr)^{0.25} \cdot \left(\frac{Pr_n}{Pr_{cm}} \right)^{0.25}$$

$$\text{Воздух } Nu_n = 0.46 \cdot Gr_n^{0.25}$$

определяющий размер d_n

Плита, стенка, горизонтально. Определяющий размер - меньшая сторона:
теплоотдающая поверхность обращена вниз

$$Nu_n = 0.7 \cdot Nu_n^{geom}$$

теплоотдающая поверхность обращена вверх

$$Nu_n = 1,3 \cdot Nu_n^{geom}$$

8.2. [3] Сушкин И.Н.

В общем случае для тел любой формы и размера, расположенных горизонтально и вертикально, для жидкостей и газов может быть использована формула Михеева М.А.

$$Nu_{cp} = C \cdot (Gr \cdot Pr)_{cp}^n$$

Жидкость, труба, пластина, вертикально

$$10^3 < (Gr \cdot Pr)_n < 10^9 \quad Nu_n = 0.75 \cdot (Gr \cdot Pr)_n^{0.25} \cdot \left(\frac{Pr_n}{Pr_{cm}} \right)^{0.25}$$

Воздух

$$10^3 < (Gr \cdot Pr)_n < 10^9 \quad Nu_n = 0.47 \cdot Gr_n^{0.25}$$

Труба, горизонтально

$$10^3 < (Gr \cdot Pr)_n < 10^9 \quad Nu_n = 0.5 \cdot (Gr \cdot Pr)_n^{0.25} \cdot \left(\frac{Pr_n}{Pr_{cm}} \right)^{0.25}$$

Критерии взяты при средней температуре $t_{cp} = 0,5(t_{ж} + t_{ст})$ - среднеарифметическая температура жидкости взятой вне зоны циркуляции и стенки :

$$0 < (Gr \cdot Pr)_{cp} < 10^{-3} \quad Nu_{cp} = 0.5 \cdot (Gr \cdot Pr)_{cp}^0$$

$$10^{-3} < (Gr \cdot Pr)_n < 500 \quad Nu_{cp} = 1,18 \cdot (Gr \cdot Pr)_{cp}^{\frac{1}{8}}$$

$$500 < (Gr \cdot Pr)_n < 2 \cdot 10^7 \quad Nu_{cp} = 0,54 \cdot (Gr \cdot Pr)_{cp}^{0.25}$$

$$2 \cdot 10^7 < (Gr \cdot Pr)_n < 10^{13} \quad Nu_{cp} = 0,135 \cdot (Gr \cdot Pr)_{cp}^{\frac{1}{3}}$$

$$\text{если } (Gr \cdot Pr)_{cp} \leq 1 \quad Nu_{cp} = 0,5 \quad \alpha = \frac{\lambda}{d}$$

8.3. [4] Крутов В.И.

При построении критериальных уравнений подобия величины μ , λ , c , ρ относят к определяющей температуре :

$T_{ж}$ - среднемассовая жидкости в трубах ;

T^∞ - потока обтекающего тело ;

$T_{ст}$ - поверхности тела .

Критерий Релея

$$Ra = Gr \cdot Pr = \frac{g \cdot l^3 \cdot \beta}{\nu \cdot a} \Delta T$$

Воздух, стенка, вертикально

$$Nu_x = 0.359 \cdot Gr_x^{0.25} \quad Ra < 0.7 \cdot 10^9 \text{ - ламинарный}$$

$$Nu_x = \frac{\alpha \cdot x}{\lambda}; \quad Gr = \frac{g \cdot x^3 \cdot \beta (T_{cm} - T^\infty)}{\nu^2} \quad Pr = 0.73$$

Воздух, горизонтальный цилиндр

$$Ra_x < 0.7 \cdot 10^9 \quad Pr = 0.73 \quad Nu_n = 0.604 \cdot f(\varphi) \cdot Gr_x^{0.25} \cdot \left(\frac{x}{d} \right)^{0.25}$$

$$Gr = \frac{g \cdot x^3 \cdot \beta (T_{cm} - T^\infty)}{\nu^2}$$

Направление потока в таблице

φ	0	30	60	90	120	150
$f(\varphi^\circ)$	0.760	0.752	0.718	0.664	0.581	0.458

Вертикальная пластина, воздух и жидкость

$$10^9 < Ra < 10^{12}; 0.7 < Pr < 10$$

Формула Эккерта

$$Nu_x = 0.0295 \cdot Ra_x^{0.4} \cdot Pr^{0.067} \cdot (1 + 0.494 \cdot Pr^{0.67})^{-0.4}$$

$$Nu_x = \frac{\alpha \cdot x}{\lambda}; Ra_x = \frac{g \cdot x^3 \cdot \beta \cdot \Delta T}{\nu \cdot a}$$

8.5. [5] Краснощеков Е.А. стр.145

Теплопередача при естественной конвекции для вертикальных и горизонтальных поверхностей: труб, плит, определяется уравнением:

$$Nu_l = C \cdot Ra_{жс}^n \left(\frac{Pr_{жс}}{Pr_{см}} \right)^{0,25}$$

Индексы "ж" и "ст" означают, что физические свойства жидкости выбираются соответственно при температуре жидкости вдали от поверхности теплообмена и при температуре стенки. при движении вдоль вертикальной поверхности за определяющий размер принимается высота поверхности теплообмена, а для горизонтального цилиндра - его наружный диаметр.

Вертикальная пластина, труба

$$10^3 < Ra_{жс} < 10^9; Nu_{жс} = 0,75 \cdot Ra_{жс}^{0,25} \left(\frac{Pr_{жс}}{Pr_{см}} \right)^{0,25}$$

$$6 \cdot 10^{10} < Ra_{жс}; Nu_{жс} = 0,15 \cdot Ra_{жс}^{0,333} \left(\frac{Pr_{жс}}{Pr_{см}} \right)^{0,25}$$

Для горизонтальной трубы

$$10^3 < Ra_{жс} < 10^9; Nu_{жс} = 0,5 \cdot Ra_{жс}^{0,25} \left(\frac{Pr_{жс}}{Pr_{см}} \right)^{0,25}$$

$$\beta_{жс} = \frac{1}{t_{жс} + 273}; Ra_{жс} = (Gr Pr)_{жс} = \frac{g \cdot \beta_{жс} \cdot l^3 (t_{см} - t_{жс})}{\nu_{жс}^2} \cdot Pr_{жс}$$

$$\alpha = Nu_{жс} \cdot \frac{\lambda_{жс}}{l}$$

9. Решение задач.

9.1. Задача 1 [5] 7-1 стр. 145.

Горизонтальный цилиндрический теплообменник $d = 400$ мм, охлаждается свободным потоком воздуха. Температура поверхности $t_c = 200^\circ\text{C}$, температура воздуха в помещении $t_b = 30^\circ\text{C}$. Найти коэффициент теплоотдачи α .

9.1.1. Решение по Селиверстову В.М. [1], [2].

Труба горизонтальная, воздух. Определяющий размер d_n .

$$Nu_n = 0,46 \cdot Gr_n^{0,25}; 10^3 < (Gr Pr)_n < 10^9; t_n = 30^\circ\text{C}; Pr=0.701$$

$$Gr = \beta \frac{gd^3(200-30)}{\nu^2} = \frac{1}{30+273} \cdot \frac{9.81 \cdot 0.4^3 \cdot 170}{(1.6 \cdot 10^{-5})^2} = 1.376 \cdot 10^9$$

$$Gr Pr = 9.65 \cdot 10^8 < 10^9 \text{ условие выполнено}$$

$$Nu = 0.46 \cdot (9.65 \cdot 10^8)^{0.25} = 81.07; \alpha = \frac{Nu_n \cdot \lambda_n}{d}$$

$$\lambda = 2.67 \cdot 10^{-2} \quad \alpha_n = \frac{81,07 \cdot 2,67 \cdot 10^{-2}}{0,4} = 5,41 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \text{град}}$$

$$\text{По Селиверстову В.М. } \alpha_n = 5,41$$

9.1.2. Решение по Сушкину И.Н. [3].

Труба горизонтальная, воздух. Определяющий размер d_n : $t_{ж} = 30^\circ\text{C}$, $t_{ст} = 200^\circ\text{C}$, $d_n = 0,4$ м.

$$t_{cp} = \frac{t_{ж} + t_{ст}}{2} = \frac{200 + 30}{2} = 115^\circ\text{C}$$

$$\lambda = 3,31 \cdot 10^{-2}; \nu = 24,87 \cdot 10^{-6}; Pr = 0.687$$

$$Gr = \beta \frac{gd^3(200-30)}{\nu^2} = \frac{1}{30+273} \cdot \frac{9.81 \cdot 0.4^3 \cdot 170}{(24.87 \cdot 10^{-6})^2} = 4.45 \cdot 10^8$$

$$Ra_{cp} = (Gr Pr)_{cp} = 3.06 \cdot 10^8 < 10^{13} \text{ условие выполнено}$$

$$\alpha_{cp} = \frac{Nu_{cp} \cdot \lambda_{cp}}{d} = \frac{90,9 \cdot 3,31 \cdot 10^{-2}}{0,4} = 7,52 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \text{град}}$$

$$\text{По Сушкину И.Н. } \alpha_{cp} = 7,52 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \text{град}}$$

9.1.3. Решение по Крутову В.И. [4].

Горизонтальный цилиндр, местный коэффициент для воздуха

$$Nu_x = 0.604 \cdot f(\varphi) \cdot Gr_x^{0.25} \cdot \left(\frac{x}{d}\right)^{0.25}; \quad Pr=0.73$$

принято $x = d$ $Nu_x = 0.604 \cdot f(\varphi) \cdot Gr_x^{0.25}$

$$\beta = \frac{1}{303}; \quad \nu_{жс} = 1,6 \cdot 10^{-5}; \quad f(\varphi = 90^\circ) = 0.664$$

$$Gr_d = \beta \frac{gd^3(200-30)}{\nu^2} = \frac{1}{303} \cdot \frac{9.81 \cdot 0.4^3 \cdot 170}{(1.6 \cdot 10^{-5})^2} = 1.38 \cdot 10^9$$

$$Ra_d = Gr_d Pr = 1 \cdot 10^9 \quad Ra_x < 0.7 \cdot 10^9 \text{ условие не выполнено}$$

$$Nu_d = 0.604 \cdot 0,664 \cdot (1,38 \cdot 10^9)^{0.25} = 77,24$$

$$\alpha = \frac{Nu_d \cdot \lambda_{жс}}{d}; \quad \lambda_{30} = 2,67 \cdot 10^{-2}$$

$$\alpha = \frac{77,24 \cdot 2,67 \cdot 10^{-2}}{0,4} = 5,16 \frac{Вт}{м^2 \cdot град}$$

По Крутову В.И. $\alpha = 5,16 \frac{Вт}{м^2 \cdot град}$

9.1.4. Решение по Краснощекову Е.А. [5].

$$Nu_{жс} = C \cdot (Gr Pr)_{жс}^n \cdot \left(\frac{Pr_{жс}}{Pr_{см}}\right)^{0.25}; \quad t_{жс} = 30^\circ C; \quad \nu_{жс} = 1,6 \cdot 10^{-5}$$

$$\beta = \frac{1}{303}; \quad \lambda_{жс} = 2,67 \cdot 10^{-2}; \quad Pr_{жс} = 0.701$$

$$Ra_{жс} = (Gr Pr)_{жс} = \beta_{жс} \frac{gd^3 \Delta t}{\nu^2} \cdot Pr_{жс} = \frac{9.81 \cdot 0.4^3 (200-30) \cdot 0.701}{303 \cdot (1.6 \cdot 10^{-5})^2} = 9.65 \cdot 10^8$$

$C=0.5$ $n = 0.25$ для горизонтальной трубы

$$\left(\frac{Pr_{жс}}{Pr_{см}}\right)^{0.25} \text{ — для жидкостей}$$

$$Nu_{жс} = C \cdot Ra_{жс}^n = 0.5 \cdot (9.65 \cdot 10^8)^{0.25} = 88.1$$

$$\alpha = \frac{Nu_{жс} \cdot \lambda_{жс}}{d} = \frac{88,1 \cdot 2,67 \cdot 10^{-2}}{0,4} = 5,88 \frac{Вт}{м^2 \cdot град}$$

По Краснощекову Е.А. $\alpha = 5,88 \frac{Вт}{м^2 \cdot град}$

Результаты решения задачи №1 по уравнениям разных авторов представлены в таблице .

№	Селиверстов	Сушкин	Крутов	Краснощеков
α	5.41	7.52	5.16	5.88
$q, Вт/м^2$	919.7	1278.4	877.2	999.6
$\Delta\%$	92%	128%	88%	100%

9.2. Задача 2 [3] 13-13 стр. 171.

Вертикальный цилиндрический теплообменник $d = 400$ мм, $h = 4$ м, $t_{ст} = 370^\circ\text{C}$ охлаждается свободным потоком воздуха, температура воздуха в помещении $t_{в} = 30^\circ\text{C}$. Найти коэффициент теплоотдачи α и Q .

9.2.1. Решение по Селиверстову В.М. [1], [2].

Труба вертикальная, воздух. Определяющий размер h .

$$Ra_n = (Gr Pr)_n \quad Gr_n = \beta \frac{gh^3 (t_{ст} - t_{жс})}{\nu_{жс}^2}$$

$$\beta = \frac{1}{303}, \quad \nu_{жс} = 1,6 \cdot 10^{-5}, \quad Pr = 0.701, \quad \lambda_{жс} = 2,67 \cdot 10^{-2}$$

$$Gr = \frac{1}{30 + 273} \cdot \frac{9.81 \cdot 4^3 \cdot (370 - 30)}{(1.6 \cdot 10^{-5})^2} = 2.75 \cdot 10^{12}$$

$$Ra_n = 1.93 \cdot 10^{12} \geq 10^9$$

$$Nu_n = 0.132 \cdot Gr_n^{0.33} = 0.132 (2.75 \cdot 10^{12})^{0.33} = 1681.3; \quad \alpha = \frac{Nu_n \cdot \lambda_n}{d}$$

$$\alpha_n = \frac{1681.3 \cdot 2,67 \cdot 10^{-2}}{4} = 11.22 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \text{град}}$$

$$Q = \alpha_n \cdot S \cdot \Delta t = 11.22 \cdot \pi \cdot 0.4 \cdot 4 \cdot 340 = 19180 \text{ Вт}$$

$$\text{По Селиверстову В.М. } \alpha_n = 11.22 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \text{град}}; \quad Q = 19,180 \text{ кВт}$$

9.2.2. Решение по Сушкину И.Н. [3].

Определяющий размер d_n : $t_{ж} = 30^\circ\text{C}$, $t_{ст} = 370^\circ\text{C}$, $d_n = 0,4$ м, $h = 4$ м.

$$t_{cp} = \frac{t_{жс} + t_{ст}}{2} = \frac{370 + 30}{2} = 200^\circ\text{C}$$

$$\beta = \frac{1}{200 + 273} = \frac{1}{473}; \quad \text{воздух для } t_{cp} = 200^\circ\text{C} \quad \lambda = 3,93 \cdot 10^{-2}$$

$$\nu = 34,85 \cdot 10^{-6}; \quad Pr = 0.68 \quad Gr = \frac{1}{473} \cdot \frac{9.81 \cdot 0.4^3 \cdot 340}{(34,85 \cdot 10^{-6})^2} = 3,72 \cdot 10^8$$

$$Ra_{cp} = (Gr Pr)_{cp} = 2,527 \cdot 10^8 < 10^{13} \quad C = 0,135 \quad n = 1/3$$

$$Nu_{cp} = C \cdot Ra_{cp}^n = 0.135 \cdot (2,527 \cdot 10^8)^{0.333} = 85.3$$

$$\alpha_{cp} = \frac{Nu_{cp} \cdot \lambda_{cp}}{d} = \frac{85.3 \cdot 3,93 \cdot 10^{-2}}{0,4} = 8.39 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \text{град}}$$

$$Q = \alpha_{cp} \cdot S \cdot \Delta t = 8.39 \cdot \pi \cdot 0.4 \cdot 4 \cdot 340 = 14.33 \text{ кВт}$$

$$\text{По Сушкину И.Н. } \alpha_{cp} = 8,39 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \text{град}} \quad Q = 14.33 \text{ кВт}$$

9.2.3. Решение по Крутову В.И. [4].

Формулы для вертикального цилиндра нет . Использую формулу для вертикальной стенки .

$$t_{cm} = 370^{\circ}C; t_n = 30^{\circ}C; \beta = \frac{1}{303}; \nu_{жс} = 1,6 \cdot 10^{-5};$$

$$\lambda_{жс} = 2,67 \cdot 10^{-2}; Pr = 0.701$$

$$Ra_l = (Gr Pr)_l = \frac{\beta \cdot g \cdot l^3 \cdot \Delta t \cdot Pr}{\nu_{жс}^2} = 1.93 \cdot 10^{12}$$

$10^9 < Ra_l < 10^{12}$ условие не выполняется

$$Nu_l = 0.0246 \cdot Ra_l^{0.4} \cdot Pr^{1/5} (1 + 0.494 Pr^{2/3})^{-0.4} = 1728.27$$

$$\alpha = \frac{Nu_l \cdot \lambda_{жс}}{l}; \lambda_{30} = 2,67 \cdot 10^{-2}$$

$$\alpha = \frac{1728.27 \cdot 2,67 \cdot 10^{-2}}{4} = 11,54 \frac{Вт}{м^2 \cdot град}$$

$$Q = 11.54 \cdot \pi \cdot 0.4 \cdot 4 \cdot 340 = 19715.7 Вт$$

$$\text{По Крутову В.И. } \alpha = 11,54 \frac{Вт}{м^2 \cdot град}; Q = 19,72 кВт$$

9.2.4. Решение по Краснощекову Е.А. [5].

Для вертикальной трубы , определяющий размер длина трубы - l, м.

$$Nu_{жс} = C \cdot (Gr Pr)_{жс}^n$$

$$t_{жс} = 30^{\circ}C; \nu_{жс} = 1,6 \cdot 10^{-5}; \beta = \frac{1}{303}; \lambda_{жс} = 2,67 \cdot 10^{-2}; Pr_{жс} = 0.701$$

$$Ra_{жс} = (Gr Pr)_{жс} = \beta_{жс} \frac{g d^3 \Delta t}{\nu_{жс}^2} \cdot Pr_{жс} = \frac{9.81 \cdot 4^3 \cdot 340 \cdot 0.701}{303 \cdot (1.6 \cdot 10^{-5})^2} = 1.929 \cdot 10^{12}$$

$Ra_{жс} \geq 6 \cdot 10^{10}$, C=0.15, n = 0.333 для вертикальной трубы

$$Nu_{жс} = C \cdot Ra_{жс}^n = 0.15 \cdot (1,929 \cdot 10^{12})^{0.333} = 1867,3$$

$$\alpha = \frac{Nu_{жс} \cdot \lambda_{жс}}{h} = \frac{1867,3 \cdot 2,67 \cdot 10^{-2}}{4} = 12.46 \frac{Вт}{м^2 \cdot град}$$

$$Q = 12.46 \cdot \pi \cdot 0.4 \cdot 4 \cdot 340 = 21302 Вт$$

$$\text{По Краснощекову Е.А. } \alpha = 12,46 \frac{Вт}{м^2 \cdot град}; Q = 21,3 кВт$$

Результаты решения задачи №2 по уравнениям разных авторов представлены в таблице .

№	Селиверстов	Сушкин	Крутов	Краснощеков
α	11.22	8.39	11.54	12.46
q , Вт/м ²	19.2	14.3	19.7	21.3
$\Delta\%$	134	100	138	149

9.3. Вывод.

Различие в методах определения осредненных физических параметров и температуры жидкости приводит к тому, что на основе одних и тех же опытов разные исследователи получают разные формулы.

Результаты одинаковых задач по уравнениям конвективного теплообмена при свободном потоке четырех авторов - равноценны. Уравнения по учебнику Сушкина И.Н. дают наибольшие отклонения от уравнений других авторов, но эти уравнения очень удобны для автоматических вычислений. Поэтому эти уравнения принимаю за основу своих вычислений. Эти уравнения взяты из источника [9] автор Михеев М.А. В таблицах 3...6 систематизированы критериальные уравнения и условия подобия для решения задач конвективного теплообмена при свободном потоке .

10. Сложный теплообмен.

Разделение общего процесса переноса теплоты на элементарные явления - теплопроводность, конвекция и тепловое излучение - производится в основном из методологических соображений. В действительности же эти явления протекают одновременно и, конечно, как-то влияют друг на друга. В практических расчетах разделение таких сложных процессов на элементарные не всегда возможно и целесообразно. В этом случае количественной характеристикой процесса является коэффициент теплоотдачи $\alpha = \alpha_k + \alpha_l$, где α_k учитывает действие конвекции и теплопроводности, а α_l - действие теплового излучения. Если $t_{ж}$ - температура газа и t_c - температура тепловоспринимающей стенки, то каждой единице поверхности этой стенки передается теплота путем соприкосновения и путем излучения :

конвекция и теплопроводность

$$q_k = \alpha_k \cdot (t_{ж} - t_c)$$

тепловое излучение

$$q_l = \varepsilon \cdot c_o \cdot \left[\left(\frac{T_{ж}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_c}{100} \right)^4 \right]$$

$$q = q_k + q_l$$

$$\alpha_l = \varepsilon \cdot c_o \cdot \frac{\left(\frac{273 + t_{ж}}{100} \right)^4 - \left(\frac{273 + t_c}{100} \right)^4}{t_{ж} - t_c}$$

ε - степень черноты системы (стенки)

$$c_o = 5,67 \frac{Вт}{м^2 K^4} - \text{коэф излучения}$$

абсолютно черного тела

Таблица 1

Автор	Задача	Уравнение	Режим	Среда
В.М. Селиверстов	Труба, пластина, вертикально. Размер h.	$Nu_n = 0.76 \cdot (Gr \cdot Pr)_n^{0.25} \cdot \left(\frac{Pr_n}{Pr_c} \right)^{0.25}$	$10^3 < (Gr \cdot Pr)_n < 10^9$	Жидкость
		$Nu_n = 0.15 \cdot (Gr \cdot Pr)_n^{0.333} \cdot \left(\frac{Pr_n}{Pr_c} \right)^{0.25}$	$10^9 \leq (Gr \cdot Pr)_n$	Жидкость
		$Nu_n = 0.7 \cdot Gr_n^{0.25}$	$10^3 < (Gr \cdot Pr)_n < 10^9$	Воздух, газ двухатомный
		$Nu_n = 0.132 \cdot Gr_n^{0.333}$	$10^9 \leq (Gr \cdot Pr)_n$	Воздух, газ двухатомный
	Труба, горизонтально, dn	$Nu_n = 0.5 \cdot (Gr \cdot Pr)_n^{0.25} \cdot \left(\frac{Pr_n}{Pr_c} \right)^{0.25}$	$10^3 < (Gr \cdot Pr)_n < 10^9$	Жидкость
	Плита, стенка, размер - меньшая сторона	$Nu_n = 0.46 \cdot Gr_n^{0.25}$	$10^3 < (Gr \cdot Pr)_n < 10^9$	Воздух
		Поверхность обращена вниз		
		$Nu_n^{нис} = 0.7 \cdot Nu_n^{сепм}$		
		Поверхность обращена вверх		
		$Nu_n^{сепк} = 1.3 \cdot Nu_n^{сепм}$		

Таблица 2

Автор	Задача	Уравнение	Режим	Среда
И.Н. Сушкин	Труба, пластина, вертикально. Размер h.	$Nu_n = 0.75 \cdot Ra_n^{0,25} \cdot \left(\frac{Pr_n}{Pr_c}\right)^{0,25}$	$10^3 < Ra_n < 10^9$	Жидкость
		$Nu_n = 0.47 \cdot Gr_n^{0,25}$	$10^3 < Ra < 10^9$	Воздух
	Труба, горизонтально, dn	$Nu_n = 0.5 \cdot Ra_n^{0,25} \cdot \left(\frac{Pr_n}{Pr_c}\right)^{0,25}$	$10^3 < Ra < 10^8$	Жидкость
	Для тел любой формы расположенных горизонтально и вертикально $t_{cp} = 0.5 \cdot (t_{жс} + t_{см})$ ↓ $\beta; \lambda; \nu$	$Nu_{cp} = C \cdot Ra_{cp}^n$		Жидкость, газ
		$Nu_{cp} = 0,5; \alpha = 0.5 \cdot \frac{\lambda_{cp}}{d}$	$0 < Ra_{cp} < 10^{-3}$	
		$Nu_{cp} = 1,18 \cdot Ra_{cp}^{0,125}$	$10^{-3} < Ra_{cp} < 5 \cdot 10^2$	
		$Nu_{cp} = 0.54 \cdot Ra_{cp}^{0,25}$	$5 \cdot 10^2 < Ra_{cp} < 2 \cdot 10^7$	
		$Nu_{cp} = 0.135 \cdot Ra_{cp}^{0,333}$	$2 \cdot 10^7 < Ra_{cp} < 10^{13}$	

Таблица 3

Автор	Задача	Уравнение	Режим	Среда
В.И. Крутов	Стена, пластина, вертикально. Размер X.	$Nu_x = \frac{\alpha \cdot x}{\lambda}$		Воздух
	Ламинарный	$Nu_x = 0.359 \cdot Gr_x^{0.25}$	$Ra_x < 0.7 \cdot 10^9$	
	Турбулентный	$Nu_x = 0.0259 \cdot Ra_x^{0.4} \cdot Pr^{0.067} \cdot (1 + 0.494 \cdot Pr^{0.67})^{-0.4}$	$10^9 < Ra_x < 10^{12}$	
	Труба, пластина, вертикально. Размер l.	$Nu_l = 0.0246 \cdot Ra_l^{0.4} \cdot Pr^{0.067} \cdot (1 + 0.494 \cdot Pr^{0.67})^{-0.4}$	$10^9 < Ra_x < 10^{12}$ $0.7 < Pr < 10$	Жидкость, воздух
	Горизонтальный цилиндр. Размер dn. Направление потока f(φ).	$Nu_x = 0.604 \cdot f(\varphi) \cdot Gr_x^{0.25} \cdot \left(\frac{x}{d}\right)^{0.25}$	$Ra_x < 0.7 \cdot 10^9$	Воздух

Таблица 4

Автор	Задача	Уравнение	Режим	Среда
Е.А. Краснощеков	Труба, пластина, вертикально. Размер h.	$Nu_{жс} = 0.75 \cdot Ra_{жс}^{0,25} \cdot \left(\frac{Pr_{жс}}{Pr_{ст}} \right)^{0,25}$	$10^3 < Ra_{жс} < 10^9$	Жидкость, воздух
		$Nu_{жс} = 0.15 \cdot Ra_{жс}^{0,333} \cdot \left(\frac{Pr_{жс}}{Pr_{ст}} \right)^{0,25}$	$Ra_{жс} \geq 6 \cdot 10^{10}$	
	Труба, горизонтально. Размер dn.	$Nu_x = 0.5 \cdot Ra_{жс}^{0,25} \cdot \left(\frac{Pr_{жс}}{Pr_{ст}} \right)^{0,25}$	$10^3 < Ra_{жс} < 10^9$	Жидкость, воздух

11. Алгоритм расчета теплообмена при свободном потоке .

Алгоритм построен по Михееву М.А. [9]: теплообмен, при свободном потоке воздуха, для тел любой формы, расположенных вертикально или горизонтально .

Исходные данные:

измеряемые параметры

t_v , °С - температура воздуха, в помещении вдали от ограждения ;

t_s , °С - температура стенки ограждения ;

общие параметры

$t_{ср}$, °С - средняя температура ;

x , м - определяющий размер ;

S , м² - площадь поверхности ;

ε - степень черноты стенки ;

$\text{co} = 5,67$ - коэф излучения абсолютно черного тела ;

$g = 9,81 \text{ м/с}^2$ - ускорение свободного падения .

Условия подобия: для принятых условий расчета число Реллея $Ra = GrPr$ будет находится в пределах :

$$500 < Ra < 2 \cdot 10^7 \quad 2 \cdot 10^7 < Ra < 10^{13}$$

Так выглядит файл расчета в Excel, занимает 137 КБ. Можно решать большинство задач встречающихся на практике .

Ввод:	Параметр	Имя
Ускорение, м ² /с	9,81	_g
Коеф излучения абс черного тела	5,65	_co
Диаметр, м	0,400	_d
Длина, м	1,0	_l
Высота или ширина, м	0,0	_b
Характерный размер, м	0,400	_x
Температура воздуха, °С	30,0	_tv
Температура стенки, °С	200,0	_ts
Степень черноты стенки, Eс	0,91	_e
Счет:		
Площадь поверхности, м ²	1,257	_s
Средняя температура, Tср	115	_tsr
Бетта	0,00258	_bet
Теплопроводность воздуха при Tср	0,033325551	_lam
Коеф. кинематической вязкости	2,28343E-05	_nu
Число Релея, Ra	3,7E+08	_ra
Коеф. теплоотдачи конвекцией, Alk	6,24	_ak
Коеф. теплоотдачи излучением, All	12,59	_al
Общий коеф теплоотдачи A	18,83	_a
Тепловой поток конвекцией, Вт	1332,35	
Тепловой поток излучением, Вт	2689,44	
Тепловой поток от вертикальной поверхности, Вт	4021,79	
Горизонтальная пов. тепло идет вниз, Вт	2815,25	
Горизонтальная пов. тепло идет вверх, Вт	5228,32	
Rв сопротивление теплопередаче	0,053	

Исходные данные

$$t_g, t_c, x, S, \varepsilon, c_o = 5,67 \frac{Вт}{м^2 К^4}, g = 9,81 \frac{м}{с^2}.$$

Счет

Средняя температура потока

$$t_{cp} = \frac{t_g + t_c}{2}$$

Температурный коэф.

$$\beta = \frac{1}{t_{cp} + 273}$$

Коэффициент теплопроводности

при t_{cp}

$$\lambda_g = f(t_g)$$

$$\lambda_g = -0,235 \cdot 10^{-7} \cdot t_{cp}^2 + 0,812812 \cdot 10^{-4} \cdot t_{cp} + 0,024289$$

Коэффициент кинематической вязкости

$$\nu_g = f(t_g)$$

$$\nu_g = 0,127 \cdot 10^{-9} \cdot t_g^2 + 0,124 \cdot 10^{-6} \cdot t_g + 0,19 \cdot 10^{-4}$$

Критерий Релея

$$Ra = \frac{\beta \cdot g \cdot x^3 \cdot (t_c - t_g) \cdot 0,7}{\nu^2}$$

Если $Ra > 2 \cdot 10^3$

$$\alpha_k = \frac{0,54 \cdot Ra^{0,25} \cdot \lambda}{x}$$

Если нет

$$\alpha_k = \frac{0,135 \cdot Ra^{\frac{1}{3}} \cdot \lambda}{x}$$

$$\alpha_l = \varepsilon \cdot c_o \cdot \frac{\left(\frac{273 + t_g}{100}\right)^4 - \left(\frac{273 + t_c}{100}\right)^4}{t_g - t_c}$$

$$\alpha = \alpha_k + \alpha_l$$

Тепловой поток, Вт

$$Q_{верх} = \alpha \cdot S \cdot (t_c - t_g)$$

$$Q_{гориз}^{верх} = 1,3 \cdot \alpha \cdot S \cdot (t_c - t_g)$$

$$Q_{гориз}^{низ} = 0,7 \cdot \alpha \cdot S \cdot (t_c - t_g)$$

Степень черноты полного нормального излучения	
Материал	ε
Алюминий полированный	0,050
Алюминий окисленный	0,150
Железо окисленное	0,736
Железное литье	0,900
Сталь окисленная	0,800
Чугун окисленный	0,700
Латунь пластина тусклая	0,220
Латунь окисленная	0,600
Оцинковка блестящая	0,230
Оцинковка серая	0,280
Асбестовый картон	0,960
Дуб строганный	0,900
Кирпич красный	0,930
Кирпич огнеупорный	0,850
Лак белый	0,900
Лак черный матовый	0,970
Масляная краска разных цветов	0,940
Алюминиевый лак	0,390
Резина твердая	0,950
Стекло	0,940
Сажа	0,950
Толь	0,910
Штукатурка	0,910

12. Литература.

- [1] Селиверстов В.М. Термодинамика, теплопередача и теплообменные аппараты . М. Транспорт 1988.
- [2] Арнольд Л.В. Селиверстов В.М. Техническая термодинамика и теплопередача . М. Высшая школа. 1979.
- [3] Сушкин И.Н. Теплотехника. М. Металлургия 1973.
- [4] Крутов В.И. Теплотехника. М. Машиностроение. 1986.
- [5] Краснощеков Е.А. Задачник по теплопередаче . М. Энергия 1975.
- [6] Методичка Судовые энергетические установки . ГИИВТ. 1989.
- [7] Крутов В.И., Юдаев Б.Н. Сборник задач по технической термодинамике и теплопередаче. М. Машиностроение. 1968.
- [8] Нащокин В.В. Техническая термодинамика и теплопередача . М. Высшая школа. 1980.
- [9] Михеев М.А. Основы теплопередачи . М. Энергия 1977.
- [10] Богословский В.Н. Строительная физика. М. Высшая школа. 1982.
- [11] Богданов С.Н. и др. Холодильная техника Свойства веществ Справочник . Санкт-петербурга. Высшая школа. 1999.