

Новый графический метод расчета теплопередачи в паровозном котле.

При решении вопросов теплопередачи через стенку от одной среды к другой, исходными являются следующие два дифференциальных уравнения

$$\frac{dQ}{\tau} = k (T - t)^n dH \quad (1)$$

и

$$\frac{dQ}{\tau} = -(M + 2NT) dT \quad (2)$$

где:

dQ — количество тепла, переданное в промежуток времени τ от одной среды к другой; оно отрицательно для источника тепла и положительно для нагреваемого тела; k — коэффициент теплопередачи; T — температура источника тепла и t — температура нагреваемого тела, по обе стороны разделяющей их стенки элемента поверхности нагрева — dH ; $(M + 2NT)$ — есть действительная (не средняя) теплоемкость, при постоянном давлении и температуре T , всего количества, отдающего тепло тела, которое омывает в единицу времени поверхность нагрева — H .

Что касается показателя n при члене $(T - t)$, то разные исследователи приписывают ему различную величину. По Редтенбахеру $n = 1$; по Ранкину $n = 2$, а по исследованиям проф. Сыромятникова, наиболее достоверное значение этого показателя $n = 4/3$ (см. Сыромятников. Исследование рабочего процесса паровозного котла и пароперегревателя). Здесь следует заметить, что работы проф. Сыромятникова основаны на обширнейшем экспериментальном материале опытов над паровозами проф. Ломоносова; а потому заслуживают большого доверия.

Возвращаясь к уравнениям (1) и (2) мы видим, что левые их части равны, а следовательно равны и правые, т. е.

$$k (T - t)^n dH = -(M + 2NT) dT \quad (3)$$

или

$$kdH = -\frac{M + 2NT}{(T - t)^n} dT \quad (4)$$

Для получения связи между температурой отдающего тепло тела (т. е. температурой газов сгорания в паровозном котле) и омывтой им поверхностью нагрева, необходимо произвести интегрирование одного из этих (3) и (4) дифференциальных уравнений.

Для получения выражений с которыми еще возможно оперировать при расчетах, приходится при интегрировании полагать, что коэффициент теплопередачи $k = \text{const}$ и не зависит от T . Интегрируя уравнение (4) при $t = \text{const}$ (теплопередача воде в котле), от начальной температуры газов сгорания — T_0 , до температуры T_x , с которой они уходят омывая поверхность нагрева H , получаем:

1) при $n = 1$ (гипотеза Редтенбахера)

$$\kappa' H = (M + 2 N t) \ln \frac{T_0 - t}{T_x - t} + 2 N (T_0 - T_x) \quad \dots (5)$$

(процесс интегрирования см. Сыромятников. Тепловой процесс паров за стр. 52).

2) при $n = 2$ (гипотеза Ранкина)

$$\kappa'' H = (M + 2 N t) \frac{T_0 - T_x}{(T_x - t)(T_0 - t)} + 2 N \ln \frac{T_0 - t}{T_x - t} \quad \dots (6)$$

(интегрирование см. там же стр. 68).

и 3) при $n = 4/3$ (работа Сыромятникова)

$$\begin{aligned} \kappa''' H = 3 (M + 2 N t) & \left[\frac{1}{\sqrt[3]{T_x - t}} - \frac{1}{\sqrt[3]{T_0 - t}} \right] + \\ & + 3 N \left[\sqrt[3]{(T_0 - t)^2} - \sqrt[3]{(T_x - t)^2} \right] \quad \dots (7) \end{aligned}$$

Если по одному из этих уравнений надо по заданной температуре T_x найти необходимую поверхность нагрева, то это не представляет особых затруднений. Но в большинстве случаев бывает необходимо, по известной поверхности нагрева — H , найти температуру газов сгорания T_x , которую они будут иметь омыв эту поверхность. Для таких расчетов уравнения (5), (6) и (7) очень неудобны т. к. они не решаются алгебраически. Здесь можно идти только путем пробных подстановок, а это в достаточной мере утомительная работа.

Правда этим уравнениям, путем алгебраических переделок, можно придать несколько более удобный вид, например:

$$1) \text{ при } n = 1 \lg (T_x - t) = a_1 - b_1 T_x \quad \dots (8)$$

$$2) \text{ при } n = 2 (T_x - t) \lg (T_x - t) = a_2 + b_2 (T_x - t) \quad \dots (9)$$

$$\text{и } 3) \text{ при } n = 4/3 (T_x - t) = a_3 + b_3 \sqrt[3]{T_x - t} \quad \dots (10)$$

$$\text{где } a_1 = \lg (T_0 - t) + \frac{2 N T_0 - \kappa' H}{2,3026 (M + 2 N t)} \quad \dots (11)$$

$$b_1 = \frac{2 N}{2,3026 (M + 2 N t)} \quad \dots (12)$$

$$a_2 = \frac{M + 2 N t}{2,3026} \quad \dots (13)$$

$$b_2 = 2 N \lg (T_0 - t) - \frac{M + 2 N t + \kappa'' H (T_0 - t)}{2,3026 (T_0 - t)} \quad \dots (14)$$

$$a_3 = \frac{M + 2 N t}{N} \quad \dots (15)$$

и

$$b_3 = \sqrt[3]{(T_0 - t)^2} - \frac{3 M + 6 N t + \kappa''' H \sqrt[3]{T_0 - t}}{3 N \sqrt[3]{T_0 - t}} \quad \dots (16)$$

Уравнения (8), (9) и (10) после подстановки в них значений коэффициентов, вычисленных по формулам (11) — (16), более удобны для расчета. Их можно решать или аналитически, путем пробных подстановок или графически, строя кривые функций от $(T_x - t)$, которые представляют из себя отдельно правые и левые части уравнений; в пересечении двух таких кривых мы получаем на оси T_x значение корня уравнения.

Кроме этого пути определения теплопередачи в паровозном котле, возможен еще графический способ проф. Гриневецкого, подробно изложенный у проф. Сыромятникова, (Тепловой процесс паровоза стр. 55). Этот способ пригоден только при $n = 1$ и $k = \text{const}$ т. е. для гипотезы Редтенбахера и постоянного коэффициента теплопередачи.

Между тем, очень обстоятельные работы проф. Сыромятникова выяснили, что, например, в дымогарных трубках паровозного котла коэффициент теплопередачи меняется по закону:

$$K_g = 6 + 2,45 W_g^{0,7} \dots \dots \dots (17)$$

где W_g — скорость (в м/сек) течения газов сгорания в трубках. Эта скорость всегда может быть выражена через секундное весовое количество газов сгорания, проходящее по дымогарным трубкам, через их температуру и через сумму поперечных сечений всех трубок, т. е. в конце концов $k = f(T)$.

Но попытка введения переменного k в уравнение (4), дает после интегрирования невероятно сложные выражения, уже вовсе непригодные для практической работы с ними. Способ Гриневецкого совсем не допускает переменного коэффициента теплопередачи.

Между тем, условное принятие постоянного k , заставляет при расчетах, для определения его, задаваться каким то значением T_x , определять по нему среднюю скорость течения газов в трубках и по ней находить среднее значение k . Если после подстановки этой величины в уравнение теплопередачи, из него определится значение T_x заметно отличающееся от того, которым мы задавались при определении $(W_g)_{\text{сред}}$ и $k_{\text{сред}}$, то вся процедура начинается сначала, до тех пор, пока предварительное значение T_x не будет выбрано достаточно удачно.

Среднее значение коэффициента теплопередачи отличается от действительной его величины на концах дымогарных трубок (т. е. при T_0 и T_x) на 20—30%. Это отклонение вызывает неправильное очертание расчетной температурной кривой по длине дымогарных труб (или жаровых—это безразлично) т. е. кривой $T = f(H)$. Действительная температурная кривая имеет большую кривизну, как это видно на фиг. 1. Принятие гипотезы Редтенбахера т. е. $n = 1$, еще усиливает это отклонение.

Эта неточность не существенна, если в расчете фигурирует паровоз с длиной дымогарных труб около 4,5 mtr (эту длину имели почти все паровозы, над которыми производил свои опыты Ломоносов) и если при этом мы не интересуемся очертанием кривой $T = f(H)$. Но уже, например, переход к более длинным трубкам может вызвать заметную ошибку в определении T_x , а там где важно знать очертание $T = f(H)$, как например, при определении теплопередачи в перегревателе, там и вовсе разница становится ощутительной. Эта неточность

и необходимость производить предварительные пробные расчеты для определения k , указывает на несовершенство принятых методов теплового расчета.

Всех этих недостатков можно избежать если уравнение (3) не интегрировать в общем виде, а представив его как:

$$\frac{dH}{dT} = - \frac{M + 2NT}{k(T-t)^n} \dots \dots \dots (18)$$

вычислить эту производную от H по T для данного конкретного случая и произвести интегрирование графическим путем для получения $H = f(T)$.

Здесь возможны два способа. Первый—это при любых k и n , вычислить значения правой части уравнения (18) для нескольких значений T , начиная с T_0 , по найденным точкам построить плавную кривую:

$\frac{dH}{dT} = \varphi(T)$ и спланиметрировав площадь между нею, осью T и граничными ординатами температур T_0 и T_x , найти $H = \psi(T)$, как это показано на фиг. 2.

Для нахождения T_x по заданному H этот способ не удобен т. к. требует определения ее пробным планиметрированием до получения площади равной заданному H .

Второй способ состоит в графическом определении величины отношения числителя и знаменателя правой части уравнения (18) и графическом получении из него кривой $H = \psi(T)$. Производится это построение как указано на фиг. 3.

Ниже оси T проводится прямая — $(M + 2NT) = \xi_1(T)$, выше ее, по вычисленным точкам, строится кривая $k(T-t)^n = \xi_2(T)$. Затем, как показано на чертеже, делим, начиная от T_0 , обе эти кривые на ряд отрезков вертикальными линиями: aa_1 , bb_1 , cc_1 и т. д. (отрезки любой величины и могут быть неравны). Каждый из этих участков делим пополам вертикалями: $1'p_1$, $2'p_2$ и т. д. При помощи циркуля, или угольника в 45° , откладываем величину $\xi_2(T)$ на ординате $1-1'$ влево от точки 1 , получаем точку m_1 , соединяем ее с точкой p_1 прямой. Из точки p_1 , параллельно m_1p_1 , проводим прямую p_1p_2 , до линии bb_1 , т. е. до границы следующего участка. Ту же операцию проделываем и на втором участке, проводя на нем из точки p_2 линию p_2p_3 , параллельную m_2p_2 и т. д. Полученная ломанная линия $p_1p_2p_3 \dots$ вписана в кривую $H = \psi(T)$. Что это так доказывается легко.

Действительно: отрезок $1m_1$ изображает в некотором масштабе величину $k(T-t)^n$, при данном T , соответствующем точке 1 , а отрезок $1p_1$, тоже в своем масштабе, величину — $(M + 2NT)$, при том же T . Отношение этих двух величин, т. е.

$$- \frac{M + 2NT}{k(T-t)^n} = - \frac{dH}{dT},$$

на чертеже измеряется величиной тангенса угла α . Но, как известно, производная функции в данной точке равна тангенсу угла, который образует касательная к кривой (выражающей данную функцию) в этой точке, с осью абсцисс, а следовательно, проводя из начальной точки p_1 (соответствующей T_0) линию p_1p_2 , параллельную m_1p_1 , мы получаем, приближенно, отрезок кривой $H = \psi(T)$ на 1-м участке. Чем большее число участков мы будем брать, тем плотнее полученная ломанная линия будет вписываться в истинную кривую $H = \psi(T)$.

Масштаб для ординат H получается из масштабов принятых для построения функций ξ_1 и ξ_2 и из масштаба для T .

Именно, если мы для $\xi_1 = -(M + 2 N T)$ выберем масштаб единицы

$$1 \frac{\text{Cal}}{h - ^\circ \text{C}} = w \text{ mm},$$

для $\xi_2 = k (T - t)^n$ масштаб единицы

$$1 \frac{\text{Cal}}{h - \text{m}^2} = v \text{ mm}$$

и для температуры масштаб единицы.

$$1^\circ \text{C} = f \text{ mm},$$

то масштаб для поверхностей нагрева будет

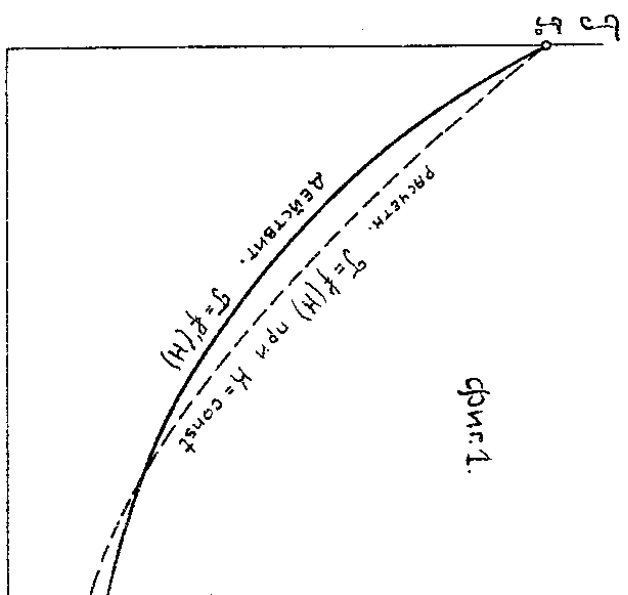
$$1 \text{ m}^2 = \frac{w \cdot f}{v} \text{ mm},$$

По найденной кривой $H = \psi(T)$ очень просто найти по заданному $H - T_x$ и наоборот—см. фиг. 4.

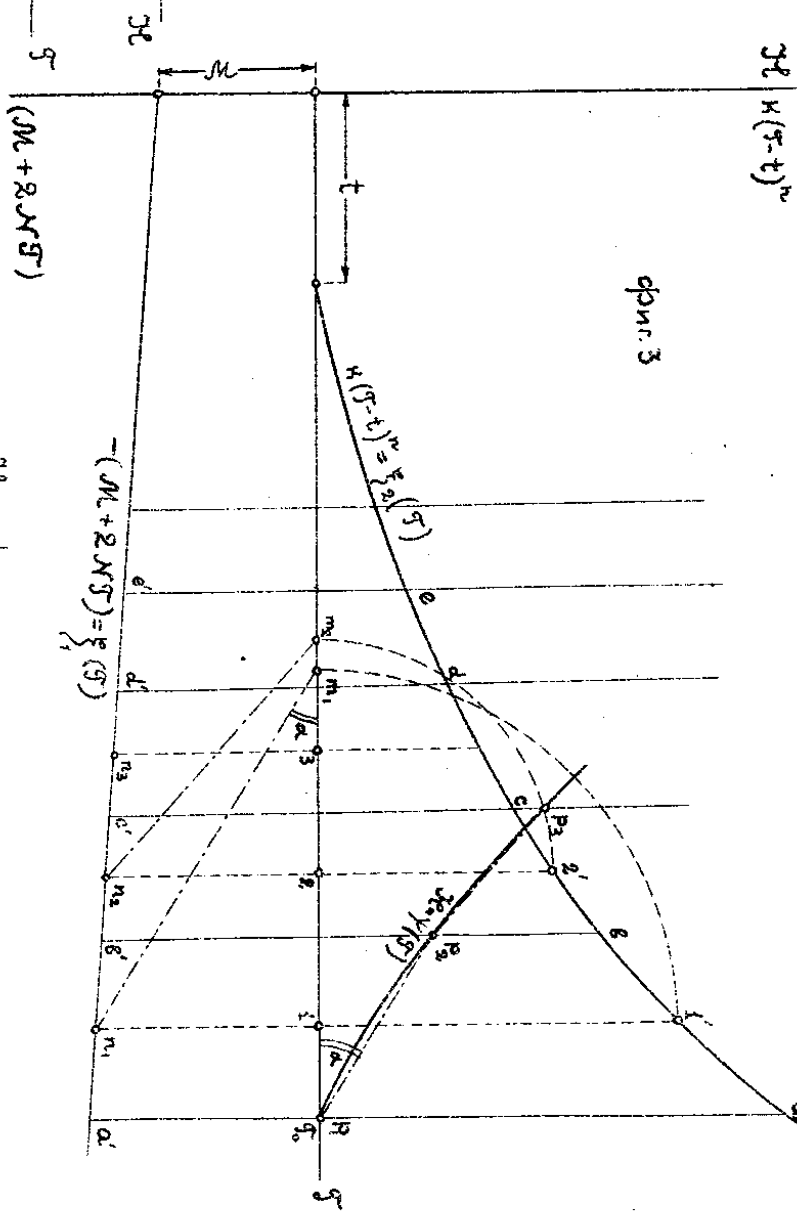
Изложенный способ построения очень гибок, совершенно не „боится“ переменного k и различных значений n и не требует никаких предварительных расчетов т. к. оперирует не со средней величиной k , которой нужно задаваться, а со значением коэффициента теплопередачи в данной точке.

Здесь следует еще отметить, что величина показателя n характеризует долю участия теплопередачи лучеиспусканием во всей теплопередаче, а следовательно возможно, что он не только дробная величина, но и переменная, зависящая от T .

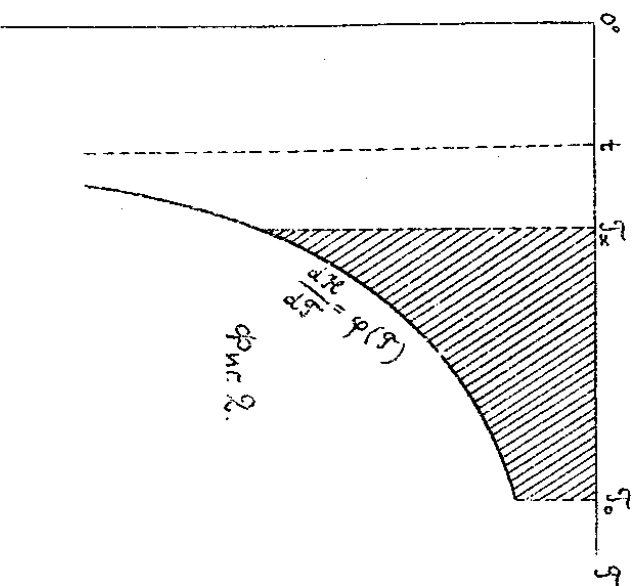
Если соответствующие исследования покажут наличие такой зависимости, то и для этого случая—переменного n —приведенный способ остается столь же простым и удобным и наиболее совершенным и универсальным.



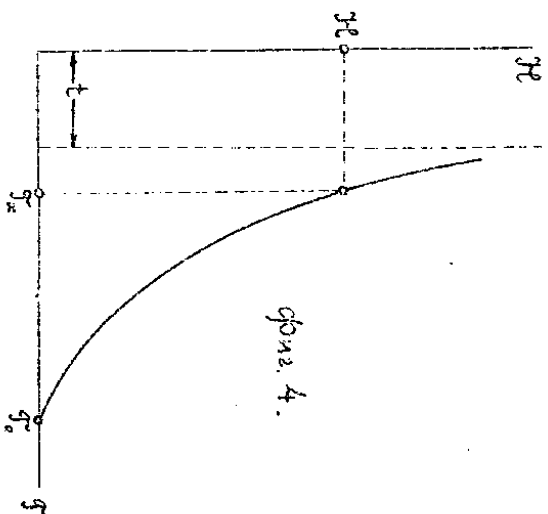
фиг. 1.



фиг. 3.



фиг. 2.



фиг. 4.