Студ. К. П. Шмидт.

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

$$\frac{dQ}{\tau} = к\,(T - t)^n\, dH \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; (1)$$

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; к—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.

$$к\,(T - t)^n\; dH = -(M + 2NT)\; dT \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; (3)$$

или

$$к\,dH = -\frac{M + 2NT}{(T - t)^n}\, dT \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; (4)$$

Для получения связи между температурой отдающего тепло тела (т. е. температурой газов сгорания в паровозном котле) и омытой 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 интегрированьи полагать, что коэффициент теплопередачи $к = const$ и не зависит от T. Интегрируя уравнение (4) при $t = const$ (теплопередача воде в котле), от начальной температуры газов сгорания — T_0, до температуры T_x, с которой они уходят омыв поверхность нагрева H, получаем:

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

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

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

2) при $n = 2$ (гипотеза Ранкина)

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

(интегрирование см. там же стр. 68).

и 3) при $n = {}^4/_3$ (работа Сыромятникова)

$$\kappa''' H = 3(M + 2Nt)\left[\frac{1}{\sqrt[3]{T_x - t}} - \frac{1}{\sqrt[3]{T_0 - t}}\right] +$$

$$+ 3N\left[\sqrt[3]{(T_0 - t)^2} - \sqrt[3]{(T_x - t)^2}\right] \ldots\ldots\ldots (7)$$

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 итти 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) при $n = 1$ $\lg(T_x - t) = a_1 - b_1 T_x$ .... (8)

2) при $n = 2$ $(T_x - t)\lg(T_x - t) = a_2 + b_2 (T_x - t)$. . . (9)

и 3) при $n = {}^4/_3$ $(T_x - t) = a_3 + b_3 \sqrt[3]{T_x - t}$ .... (10)

где

$$a_1 = \lg(T_0 - t) + \frac{2NT_0 - \kappa' H}{2{,}3026(M + 2Nt)} \ldots\ldots\ldots (11)$$

$$b_1 = \frac{2N}{2{,}3026\,(M + 2Nt)} \ldots\ldots\ldots\ldots (12)$$

$$a_2 = \frac{M + 2Nt}{2{,}3026} \ldots\ldots\ldots\ldots (13)$$

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

$$a_3 = \frac{M + 2Nt}{N} \ldots\ldots\ldots\ldots (15)$$

и

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

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 $k = const$ 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:

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

где W_g — скорость (в m/sec) 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 интегрированья 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 $(W_g)_{сред}$ и $k_{сред}$, 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 несущественна, 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:

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

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: $1'n_1$, $2'n_2$ и т. д. При помощи циркуля, или угольника в 45^0, откладываем величину $\xi_2(T)$ на ординате $1—1'$ влево от точки 1, получаем точку m_1, соединяем ее с точкой n_1 прямой. Из точки p_1, параллельно m_1n_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_2n_2 и т. д. Полученная ломанная линия $p_1p_2p_3 \ldots$ 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 $1n_1$, 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_1n_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 $\xi_1 = -(M + 2NT)$ выберем масштаб единицы

$$1 \frac{Cal}{h - {}^0C} = w\ mm,$$

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

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

и для температуры масштаб единицы.

$$1^0\ C = f\ mm,$$

то масштаб для поверхностей нагрева будет

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

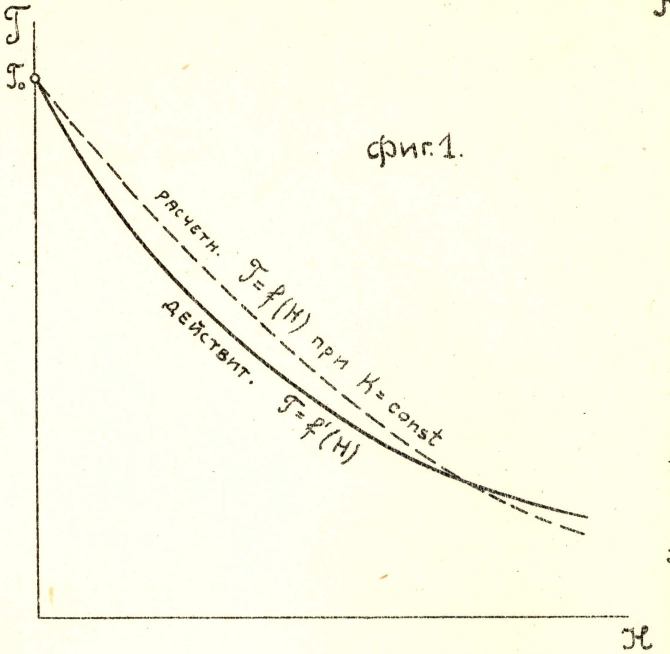
По найденной кривой $H = \psi(T)$ очень просто найти по заданному $H - T_x$ и наоборот—см. фиг. 4.

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.

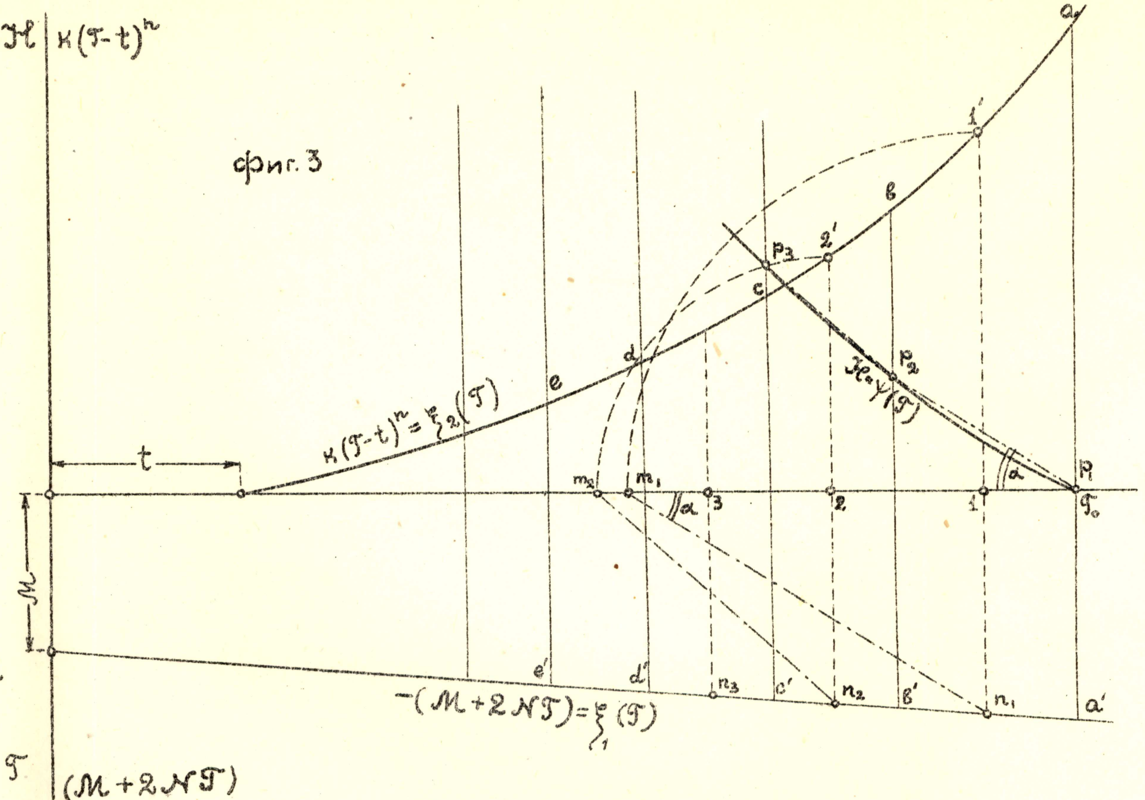
Здесь следует еще отметить, что величина показателя n характеризует долю участия теплопередачи лучеиспусканием во всей теплопередаче, а следовательно возможно, что он не только дробная величина, но и переменная, зависящая от T.

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.

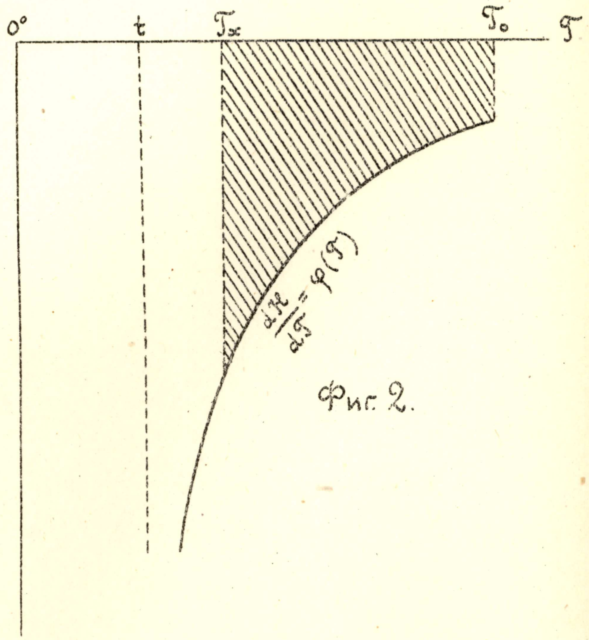
к статье студ. К. П. Шмидт.



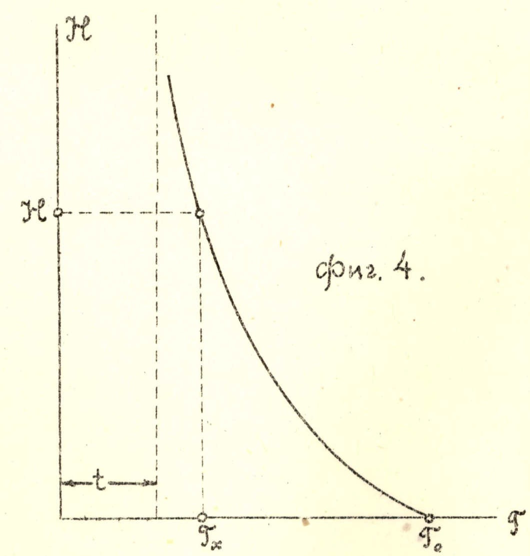
фиг. 1.



фиг. 3



фиг. 2.



фиг. 4.