

К поверочному тепловому расчёту водоводяных пластинчатых теплообменников

И.М. Сапрыкин

(ООО ПНТК «Энергетические Технологии», г. Нижний Новгород, инженер)

При разработке или наладке различных теплоэнергетических установок, включающих теплообменное оборудование, в частности пластинчатые теплообменники (ПТА), зачастую требуется выполнять детальные расчёты тепловых схем в широких диапазонах изменения мощностей и параметров теплоносителей.

ПТА, в отличие, например, от кожухотрубных теплообменников, содержат большое разнообразие форм размеров пластин и профилей их теплообменных поверхностей. Даже в пределах одного размера пластин имеется разделение на так называемые «жесткие» типа H и «мягкие» типа L пластины, различающиеся между собой коэффициентами теплоотдачи и гидравлического сопротивления. Поэтому ПТА, вследствие наличия индивидуального набора расчётных параметров, в основном изготавливаются под конкретный заказ.

Крупные производители ПТА имеют свои наработанные приёмы интенсификации процессов теплопередачи, типоразмеры пластин, эксклюзивные программы по их подбору и расчёту.

Индивидуальные особенности ПТА, относительно тепловых расчётов, заключаются в основном в различии значений постоянных A , m , n , r в выражении числа Нуссельта, участвующего в определении коэффициентов теплоотдачи

$$Nu = A \cdot Re^m \cdot Pr^n \cdot (Pr/Pr_c)^r \quad (1), \text{ где}$$

Re – число Рейнольдса;

Pr – число Прантля для теплоносителя;

Pr_c – число Прантля для теплоносителей на поверхности разделяющей стенки.

Постоянные A , m , n , r определяются экспериментальным путём, что весьма трудозатратно, их значения являются предметом интеллектуальной собственности и производителями ПТА не разглашаются.

Вследствие этого обстоятельства единая методика тепловых поверочных расчётов переменных режимов, охватывающая весь спектр ПТА, отсутствует.

В [1, 2] был предложен метод поверочных тепловых расчётов переменных режимов ПТА, исходя из того, что необходимую информацию о конкретных значениях упомянутых постоянных можно выявить из известного расчётного режима путём моделирования теплового процесса. Здесь имеется ввиду расчётный режим «чистого» теплообменника, когда все параметры определены без так называемого фактора загрязнения.

Моделирование было осуществлено с помощью критериальных уравнений конвективного теплообмена с учётом теплофизических свойств воды: теплоемкости, теплопроводности, температуропроводности, кинематической вязкости, плотности.

Однако в [1] некоторые вопросы расчётов переменных режимов ПТА остались не раскрытыми. Целью этой статьи является расширение возможностей расчёта переменных режимов водоводяных одноходовых ПТА.

В развитие метода расчёта [1] ниже предлагается более простое уравнение, полученное из уравнения 1 [1] в результате тождественных преобразований и содержащее постоянную (далее константу) ПТА C_{he} :

$$C_{he} \cdot \Theta \cdot Q^{1-m} + 10^3 \cdot (R_c + R_n) \cdot Q / F - \Delta t = 0 \quad (2), \text{ где}$$

Q – тепловая мощность через ПТА, кВт;

R_c – термическое сопротивление стенки (пластины), $m^2 \cdot ^\circ C / Вт$;

R_n – термическое сопротивление слоя накипных отложений, $m^2 \cdot ^\circ C / Вт$;

$F = (n_{ni} - 2) \cdot \ell \cdot L$ – суммарная поверхность теплообмена, m^2 ;

n_{nl} – количество пластин, шт.;

ℓ – ширина одного канала, м;

L – приведённая длина канала, м;

Δt – логарифмическая разность температур теплоносителей, °С;

$\Theta = \Theta_z + \Theta_n$ – суммарный теплофизический комплекс (ТФК), учитывающий теплофизические свойства воды. ТФК равен сумме ТФК греющего Θ_z и ТФК нагреваемого Θ_n теплоносителей:

$$\Theta_z = \frac{(t_1 - t_2)^m}{(t_1 + t_2)^u \times (t_1 + t_2 + \tau_1 + \tau_2)^y} \quad \Theta_n = \frac{(\tau_1 - \tau_2)^m}{(\tau_1 + \tau_2)^u \times (t_1 + t_2 + \tau_1 + \tau_2)^y} \quad (3, 4), \text{ где}$$

t_1, t_2 – температуры греющего теплоносителя на входе и выходе из ПТА, °С;

τ_1, τ_2 – температуры нагреваемого теплоносителя на выходе и входе в ПТА, °С.

Значения постоянных m, n, r для области турбулентного течения теплоносителей в данной модели были приняты следующими: $m=0,73, n=0,43, r=0,25$. Постоянные величины $u=0,0583, y=0,216$ были определены аппроксимацией значений теплофизических свойств воды в диапазоне 5 ... 200°С с учётом постоянных m, n, r . Постоянная A зависит от многих факторов, в том числе и от принятых постоянных m, n, r и колеблется в широких пределах $A=0,06 \dots 0,4$.

Уравнение для C_{he} , выраженной через расчётные параметры ПТА:

$$C_{he} = 10^3 \cdot (1/K_p - R_c) \cdot \frac{Q_p^m}{F \cdot \Theta_p} \quad (5), \text{ где}$$

K_p – расчётный коэффициент теплопередачи, Вт/(м²·°С);

Уравнение для C_{he} , выраженной через геометрические характеристики:

$$C_{he} = \frac{30,67 \cdot (n_{nl} - 1)^m \cdot z}{A \cdot L \cdot (n_{nl} - 2) \cdot \ell^{1-m}} \quad (6), \text{ где}$$

z – расстояние между пластинами, м.

Из совместного решения 5 и 6 определяется значение A для данного ПТА. Тогда по известному A можно определить коэффициенты теплоотдачи α_z и α_n :

$$\alpha_z = \frac{23,7 \cdot A \times Q^m}{f_z^m \times d_3^{1-m} \times \Theta_z} \quad \alpha_n = \frac{23,7 \cdot A \times Q^m}{f_n^m \times d_3^{1-m} \times \Theta_n} \quad (7, 8), \text{ где}$$

$f = (n_{nl} - 1) \cdot \ell \cdot z / 2$ – суммарная площадь сечения каналов;

$d_3 = 2 \cdot z$ – эквивалентный диаметр сечения канала, м.

Из 7, 8 следует, что значение постоянной A при заданных постоянных m, n, r является показателем эффективности ПТА.

Константа C_{he} также может быть определена экспериментально по результатам одномоментных измерений параметров в двух различных режимах работы ПТА. Измеряемые параметры в этом случае – значения тепловых мощностей, отмеченных индексами 1 и 2; значения четырёх температур теплоносителей:

$$C_{he} = \frac{\Delta t_1 / Q_1 - \Delta t_2 / Q_2}{\Theta_1 / Q_1^m - \Theta_2 / Q_2^m} \quad (9)$$

То же касается случаев, когда расчётные параметры ПТА неизвестны. К ним относятся ситуации, когда для находящегося в эксплуатации ПТА информация о начальных параметрах неизвестна, например, утеряна, либо ПТА подвергался реконструкции путём изменения поверхности нагрева (изменение количества установленных пластин).

На практике часто возникают ситуации, когда необходимо изменить, например, увеличить, передаваемую расчётную тепловую мощность ПТА. Это осуществляется установкой дополнительного числа пластин. Зависимость расчётной тепловой мощности от количества дополнительно устанавливаемых пластин, полученная из уравнения 2 с учётом 6, выглядит следующим образом:

$$Q = Q_p \cdot \left(1 + \frac{\Delta n_{nl}}{n_{nl} - 2}\right)^{\frac{1}{1-m}} / \left(1 + \frac{\Delta n_{nl}}{n_{nl} - 1}\right)^{\frac{m}{1-m}} \quad (10)$$

Естественно, что при изменении числа пластин, константа C_{he} изменится и это будет другой теплообменник.

Обычно параметры поставляемого ПТА приведены с фактором загрязнения, представленным термическим сопротивлением слоя накипи R_n^p (исходный режим). Предполагается, что в процессе эксплуатации через некоторый промежуток времени из-за накипеобразования на поверхности теплообмена образуется слой накипных отложений с «расчётным» термическим сопротивлением. Далее после этого необходима очистка поверхности теплообмена.

В начальный период эксплуатации ПТА поверхность теплообмена будет избыточной и параметры будут отличаться от параметров исходного режима. При наличии достаточной мощности теплоисточника ПТА может «разогнаться», то есть увеличить теплопередачу выше заданной. Чтобы вернуть теплопередачу к заданному значению необходимо в первичном контуре уменьшить расход теплоносителя либо снизить температуру подачи при этом в обоих случаях также снизится и температура «обратки». В результате новый режим «чистого» ПТА с Q_p и $R_n^p=0$, полученный из исходного с Q_p и $R_n^p>0$, будет являться расчётным для ПТА. Таких расчётных режимов существует бесконечное множество, но все они объединены наличием одной и той же константы C_{he} .

Для поиска расчётных параметров из исходных предлагается следующее уравнение:

$$\frac{1/K_p - R_c}{\Theta_p} = \frac{1/K_{исх} - R_c - R_n^p}{\Theta_{исх}} \quad (11), \text{ где}$$

в правой части известные $K_{исх}$, t_1 , t_2 , τ_1 , τ_2 , (следовательно и $\Theta_{исх}$), R_c , R_n^p , в левой части неизвестные - t_2^p , Θ_p , K_p . В качестве неизвестной вместо t_2 может быть принята одна из оставшихся температур t_1 , τ_1 , τ_2 или их комбинации.

Например, на котельной необходимо установить ПТА со следующими параметрами: $Q_p=1000$ кВт, $t_1=110^\circ\text{C}$, $t_2=80^\circ\text{C}$, $\tau_1=95^\circ\text{C}$, $\tau_2=70^\circ\text{C}$. Поставщиком предложен ПТА с фактической поверхностью теплообмена $F=18,48$ м² с фактором загрязнения $R_n^p=0,62 \cdot 10^{-4}$ (коэффициент запаса $\delta f=0,356$); $K_p=4388$ Вт/(м²·°C).

В таблице 2 приведены, в качестве примера, три различных расчётных режима, полученные из исходного. Последовательность расчёта: с помощью 11 вычисляется константа C_{he} ; с помощью 2 определяются необходимые расчётные режимы.

Таблица 2. Исходный и расчётные режимы ПТА.

Наименование	Размерн.	Обозн.	Тепловые режимы			
			исх.	расч. 1	расч. 2	расч. 3
Тепловая мощность	кВт	Q	1000	1090	1000	1000
Запас	-	δf	0,356	0,000	0,000	0,000
Степень чистоты	-	β	0,738	0,000	1,000	1,000
Тем-ра греющ. воды на входе	°C	t_1	110,0	110,0	110,0	106,8
Тем-ра греющ. воды на выходе	°C	t_2	80,0	77,3	75,4	76,8
Тем-ра нагрев. воды на выходе	°C	τ_1	95,0	97,3	95,0	95,0
Логарифмическая разн. темпер.	°C	Δt	12,33	9,79	9,40	9,07
ТФК	-	Θ	4,670	4,974	4,958	4,694
Коэффициент теплопередачи	Вт/(м ² ·°C)	K	4388	6028	5736	5965
Расход греющей воды	м ³ /ч	G_1	28,7	28,7	24,9	28,7
Расход нагреваемой воды	м ³ /ч	G_2	34,4	34,4	34,4	34,4
Термосопротивление слоя накипи	м ² ·°C/Вт	$10^4 \cdot R_n$	0,62	0	0	0
Константа ПТА	-	C_{he}	-	0,2416		

Расчётный режим 1 иллюстрирует разгон ПТА ($Q=1090$ кВт) при условии, что источник тепловой энергии имеет достаточную мощность, при этом при неизменных расходах температура t_2 снижается до 77,3, а температура τ_1 повышается до 97,3°C.

Расчётный режим 2 моделирует ситуацию, когда клапан регулятора температуры, установленный на трубопроводе с греющим теплоносителем, с целью поддержания постоянной температуры $t_r=95^\circ\text{C}$, уменьшает расход греющего теплоносителя до 24,9 т/ч.

Расчётный режим 3 моделирует ситуацию, когда источник тепловой энергии не имеет достаточной мощности для разгона ПТА, при этом обе температуры греющего теплоносителя снижаются.

Константа C_{he} является совокупной характеристикой, заключающей в себе геометрические характеристики и расчётные тепловые параметры. Константа неизменна в течение всего срока службы ПТА при условии сохранения постоянства начального количества и «качества» (соотношения количества пластин H и L) установленных пластин.

Таким образом, ПТА может быть смоделирован, что открывает пути для выполнения необходимых поверочных расчётов при различных комбинациях исходных данных. В качестве искомых параметров могут быть: тепловая мощность, температуры и расходы теплоносителей, степень чистоты, термическое сопротивление возможного слоя накипи.

С помощью уравнения 2 по известному расчётному режиму можно рассчитать параметры для любого другого режима, в том числе определить тепловую мощность по измеренным на портах четырём температурам теплоносителей. Последнее возможно только при условии заранее известной величины термического сопротивления слоя накипи.

Из уравнения 2 может быть определено термическое сопротивление слоя накипи R_n .

$$R_n = (\Delta t - C_{he} \cdot \Theta \cdot Q_p^{1-m}) \cdot \frac{F}{10^3 \cdot Q} - R_c = 0 \quad (12)$$

Оценка степени чистоты поверхности теплообмена для диагностики ПТА находится по формуле $\beta = 1/(1 + K_p \cdot R_n)$.

Выводы

1. Предлагаемый метод поверочного расчёта может быть использован при проектировании и эксплуатации трубопроводных систем с водоводяными одноходовыми ПТА, включая диагностику их состояния.

2. Метод позволяет по известным расчётным параметрам ПТА производить расчеты различных переменных режимов, не обращаясь к производителям теплообменного оборудования.

3. Метод можно адаптировать к расчету ПТА с другими, кроме воды, жидкими средами.

4. Предложено понятие константы ПТА и формул для расчёта. Константа ПТА является совокупной характеристикой, заключающей в себе геометрические характеристики и расчётные тепловые параметры. Константа неизменна в течение всего срока службы ПТА при условии сохранения постоянства начального количества и «качества» (соотношения количества «жёстких» и «мягких») установленных пластин.

cheleks@yandex.ru

Литература

1. Сапрыкин И.М. О поверочных расчётах теплообменников. «Новости теплоснабжения», №5, 2008. С 45...48.
2. Сапрыкин И.М. Тепловой расчёт переменных режимов водоводяных теплообменников. Сайт РосТепло.
2. Н.М. Зингер, А.М. Тарадай, Л.С. Бармина. Пластинчатые теплообменники в системах теплоснабжения. Москва, Энергоатомиздат, 1995.