

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОБМЕНА ПРИ ДВУХФАЗНОМ ВОСХОДЯЩЕМ ЗАКРУЧЕННОМ ПОТОКЕ

Как показано в исследованиях [1,2], перспективным методом интенсификации тепло- и массообмена при воздействии газожидкостных систем является использование аэродинамических возможностей закрученного двухфазного потока.

В данной статье изложены результаты экспериментального исследования теплообмена между стенкой и закрученным потоком.

Среднее значение коэффициента теплоотдачи от стенки к пленке определялось из уравнения

$$\alpha_{ст} = \frac{Q_{эл} - Q_{п}}{F(t_{ст} - t_{пл})} \quad (1)$$

где $t_{ст}$ и $t_{пл}$ - среднеинтегральные температуры стенки и пленки, °С; F - поверхность теплообмена, равная внутренней поверхности трубки, м²; $Q_{эл}$ - тепло, выделяемое нагревателем, Вт; $Q_{п}$ - тепловые потери в окружающую среду, Вт.

Экспериментальное исследование по теплообмену выполнено на установке, схема которой представлена на рис.1. Основной элемент установки - трубка-калориметр 1. На ее наружной поверхности располагается электрический нагреватель 2, состоящий из четырех регулируемых секций. Трубка-калориметр снаружи и с торцов покрывается изоляцией. Воздух, подаваемый воздуходувкой 18 по воздуховоду 19, пройдя дроссельную диафрагму 21 и закручиватель, размещенный в приемной камере 24, поступает в трубу-калориметр, приобретая при этом вращательное движение. Жидкость из водопровода подается в напорный бак постоянного уровня 9; далее через расходомер (ротаметры РС-3, РС-5) 23 направляется в приемную камеру, откуда сквозь кольцевую щель, образованную торцами закручивателя и трубки, захватывается восходящим потоком воздуха и подается в виде закрученной пленки по стенке трубки-калориметра в направлении разделительной 3 и сепарационной 4 камер.

Для измерения температуры поверхности стенки по высоте трубки-калориметра размещены двенадцать хромель-алюмелевых термопар, э.д.с. которых замерялась потенциометром КП-59 18 класса точности 0,05.

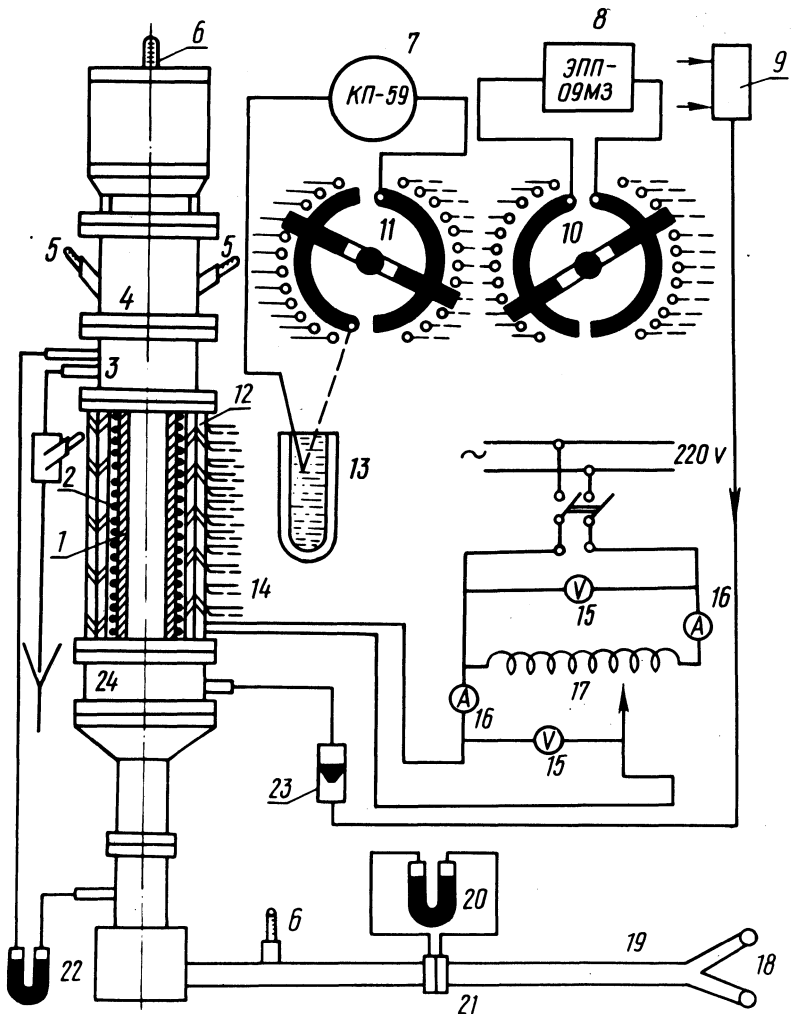


Рис. 1. Схема опытной установки.

Таблица 1. Геометрические величины закручивателей

Тип закручивателя	Шаг винтовой линии t , мм	Число заходов. Z	Угол подъема винтовой линии α	Угол крутки φ	Геометрический симплекс t/d в/н
Винтовая вставка	14	1	10	80	0,54
"	20	1	14,18	75,42	0,8
"	24	1	17	73	0,95
"	28	1	19,40	70,20	1,2
"	36	1	24,17	66	1,4
"	24	2	17	73	0,95

Таблица 2. Основные параметры трубок-калориметров

Длина трубки-калориметра l , мм	Материал	Диаметр, мм		Поверхность, м ²	
		внутренний $d_{вн}$	наружный $d_{нар}$	внутренняя $F_{вн}$	наружная $F_{нар}$
280	Сталь марки 1Х18Н9Т	26	33	0,02286	0,029
650	—, —	26	33	0,046	0,057

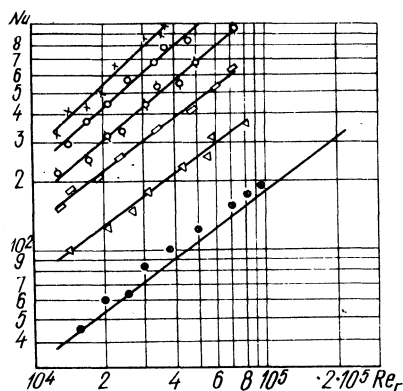


Рис. 2. Зависимость $Nu = f(Re_{Г})$ при $Re_{ж} = 380$, $t/d_{вн} = 0,95$, $Pr_{ж} = 4,8$.

1/d				1/d	
Двухфазный закрученный поток				Двухфазный осевой	Однофазный осевой
10	15	20	25	25	25
+	○	○	□	▽	⊕

По достижении стационарного режима, наступление которого определяли по электронному автоматическому потенциометру типа ЭПП-09М3, измеряли силу тока и падение напряжения в нагревателе по амперметру 16 и вольтметру 15, температуру жидкости и воздуха на входе и выходе из установки ртутными термометрами 6 с ценой деления $0,1^{\circ}C$, э.д.с. термопар, показания психрометров 5 на входе и выходе из установки и перепад давления по дифманометру 22.

После наладочных и градуировочных экспериментов было проведено двенадцать серий основных опытов. В опытах определялся коэффициент теплоотдачи в зависимости от режимов движения газа, жидкости и геометрических параметров закручивателей, характеристика которых приводится в табл. 1.

Характеристика трубок-калориметров, на которых были проведены опыты, приводится в табл. 2.

Опыты проводились в диапазоне изменения следующих параметров: числа Рейнольдса по воздуху $Re = 13600 - 78000$; числа Рейнольдса по жидкости $Re_{ж} = 50 - 900$; симплекса закрутки $\frac{t}{d_{вн}} = 0,54 - 1,4$; критерия Прандтля $Pr_{ж} = 2,2 - 5,5$; средней температуры жидкости $t = 30 - 80^{\circ}C$.

Обработка результатов исследования производилась по известной методике [3 - 5].

На рис.2 представлена зависимость $Nu = f(Re_{\Gamma})$.

Физические параметры принимались по средней арифметической температуре жидкости и газа, а за определяющий размер взят внутренний диаметр трубки-калориметра.

Для выяснения влияния геометрических характеристик закручивателя на теплообмен построен график в логарифмической анаморфозе (рис.3), из которого следует, что теплообмен интенсифицируется с уменьшением относительного шага закручивателя.

Рис. 3. Влияние относительного шага закручивателя на теплообмен: 1 - $Re_{\Gamma} = 13,6 \cdot 10^3$; 2 - $18,9 \cdot 10^3$; 3 - $23,8 \cdot 10^3$; 4 - $25,5 \cdot 10^3$; 5 - $32,8 \cdot 10^3$; $Re_{ж} = 180$, $1/d_{вн} = 10$.

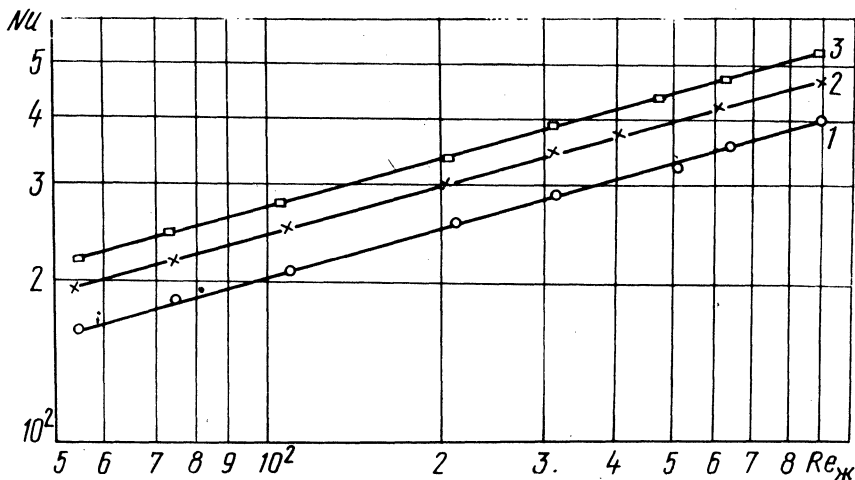
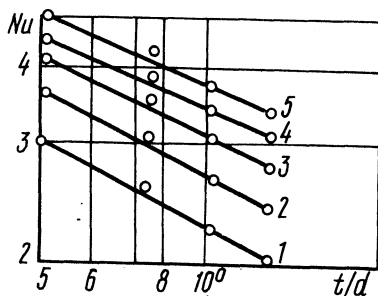


Рис. 4. Зависимость Nu от $Re_{ж}$ при $t/d_{вн} = 0,95$; $1/d_{вн} = 10$; 1 - $Re_{\Gamma} = 13,6 \cdot 10^3$; 2 - $18,9 \cdot 10^3$; 3 - $25,5 \cdot 10^3$.

Чтобы представить, как влияет орошение жидкости на величину коэффициента теплоотдачи по материалам опытов, построен график (рис.4).

Таблица 3. Опытные значения коэффициентов критериального уравнения

Тип закручивающего	Относительная длина $l/d_{вн}$	Геометрический симплекс $t/d_{вн}$	Границы режимов			с	m	n	q	р
			$Re_{г} \cdot 10^{-3}$	$Re_{ж} \cdot 10^{-2}$	$Pr_{ж}$					
Винтовая вставка	10,75	0,54-1,4	13,6-78	0,5-9	2,2-5,5	0,01	0,85	0,3	0,4	-0,32
"	25	0,54-1,4	13,6-78	0,5-9	2,2-5,5	0,007	0,8	0,3	0,4	-0,25

Опытные данные по теплообмену для исследованного диапазона основных параметров могут быть аппроксимированы зависимостью вида

$$Nu = C Re_{г}^m Re_{ж}^n Pr_{ж}^n \left(\frac{t}{d_{вн}} \right)^p. \quad (2)$$

Критерии подобия определялись по следующим формулам:

$$\text{критерий Нуссельта } Nu = \frac{\alpha_{ст} d_{вн}}{\lambda_{ж}};$$

$$\text{критерий Рейнольдса для газа } Re_{г} = \frac{W_{г} d_{вн} \rho_{г}}{\mu_{г}};$$

$$\text{критерий Рейнольдса для жидкости } Re_{ж} = \frac{4\Gamma}{\mu_{ж}};$$

$$\text{критерий Прандтля } Pr_{ж} = \frac{\mu_{ж} c_{ж}}{\lambda_{ж}},$$

где Γ - плотность орошения, $кг/м \cdot с$; $\rho_{г}$ - плотность воздуха, $кг/м^3$, $\lambda_{ж}$ - коэффициент теплопроводности жидкости, $Вт/м \cdot град$; $\mu_{г}, \mu_{ж}$ - коэффициент вязкости воздуха, жидкости $Н \cdot с/м^2$; $c_{ж}$ - удельная теплоемкость жидкости, $Дж/кг \cdot град$; $w_{г}$ - осевая скорость газа, $м/с$.

Значения коэффициентов c, m, n, q и p приведены в табл.3.

Резюме. Двухфазные закрученные потоки существенно интенсифицируют теплообмен.

В результате сопоставления энергетических затрат на закручивание потока и количества перенесенного при этом тепла определен оптимальный диапазон геометрического симплекса винтовой вставки, равный 0,8 - 1,4.

Опытные данные, обобщенные в критериальной форме, позволили получить уравнение (2), которое может быть использовано при расчете аппаратов с двухфазным закрученным потоком.

Л и т е р а т у р а

1. Большаков А.Г., Рябых В.Г. Исследование гидродинамики теплообменника с закрученными потоками газа и жидкости. - "Изв. вузов СССР. Энергетика", 1970, №9.
2. Гухман Л.М., Ершов А.И., Плехов И.М. Исследование гидродинамики и массопередачи в цилиндрическом контактном устройстве при двухфазном закрученном потоке. - В сб.: Общая и прикладная химия. Минск, 1970, вып.3.
3. Осипова В.А. Экспериментальное исследование процесса теплообмена. М., 1962.
4. Кассандрова О.Н., Лебедев В.В. Обработка результатов наблюдений. М., 1970.
5. Батунер Л.М., Позин М.Е. Математические методы в химической технике. М., 1971.

УДК 666.973

А.П. Лебедев (канд. техн. наук)

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ РАЗЛИЧНЫХ СПОСОБОВ ТВЕРДЕНИЯ БЕТОНА

Для термодинамических систем с переменной массой, к которым относится твердеющее бетонное изделие, уравнение Гиббса имеет вид

$$dH = dq + V dp + \sum \mu_i dV_i + C_p dM - r dM', \quad (1)$$

где H - энтальпия термодинамической системы; q - количество тепла, подведенное к системе; V - объем порового пространства в системе; V_i - количество воды, участвующее в гидратации цемента; μ_i - химический потенциал i -й реакции гидратации; r - теплота парообразования; C_p - теплоемкость воды, вносимая в систему; M - масса воды, вносимая в систему; M' - масса воды, удаляемая из системы; p - давление жидкой и газообразной фаз в системе.

При твердении бетона в нормальных температурно-влажностных условиях ($t = 18 - 20^\circ\text{C}$ и $\varphi = 95 - 100\%$), т.е. при отсутствии тепло- и массообмена с окружающей средой $dq = 0$ и $dM = 0$. Для этого случая твердения бетонной смеси уравнение (1) принимает вид

$$dH = V dp + \sum \mu_i dV_i. \quad (2)$$