

УДК 621.75.44

Исследование процесса конденсации водяного пара на модели контактного аппарата с регулярной орошаемой насадкой

Д.В. ВИНОГРАДОВ, канд. техн. наук В.Т. ПЛОТНИКОВ

Санкт-Петербургский государственный университет низкотемпературных и пищевых технологий

The effective apparatuses for some conditions of use of water-vapor heat pumps are contact apparatuses with regular packing. Results of investigations of the process of condensation of water vapor on the model of a contact apparatus with the promising regular sprayed packing developed at the State institute of nitrogen industry are considered in the article.

Для некоторых условий работы пароводяных тепловых насосов наиболее эффективны контактные аппараты с регулярной насадкой. Одной из перспективных является плоскопараллельная насадка с турбулизаторами, разработанная в Государственном институте азотной промышленности (рис. 1). Основные ее характеристики:

- ✓ коэффициент порозности $E = 0,93$;
- ✓ удельная поверхность $a = 132,2 \text{ м}^2/\text{м}^3$;
- ✓ эквивалентный диаметр $d_{\text{экв}} = 0,02826 \text{ м}$.

Преимуществами такой насадки являются нагрев среды до $27 \text{ }^\circ\text{C}$, малая удельная масса, относительно высокая удельная поверхность и порозность, технологичность сборки и монтажа. Дополнительные сведения по аэродинамическим и гидродинамическим характеристикам рассматриваемой насадки приведены в [1, 2].

Основной сложностью процесса конденсации водяного пара является невозможность теоретически предсказать форму и движение элементов кон-

тактирующих сред, изменение формы (капля, струя, пленка) в зависимости от гидродинамического режима в любой момент времени и сечения аппарата. Из-за отсутствия достоверных данных по конденсации водяного пара в аппаратах с такой насадкой были проведены экспериментальные исследования.

Схема экспериментального стенда представлена на рис. 2.

Стенд состоит из корпуса модельного аппарата 3, самовсасывающего насоса 1, вакуумного насоса 5, парогенератора 8. Внутри вертикально расположенного корпуса аппарата вмонтированы 18 слоев исследуемой насадки 10 с общей высотой блока 1 м

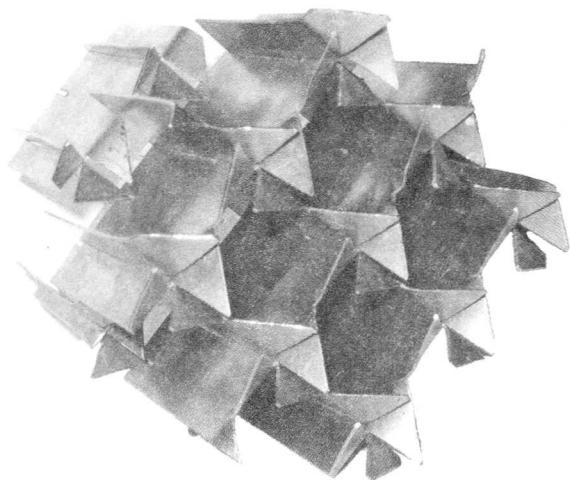


Рис. 1. Общий вид плоскопараллельной насадки с турбулизаторами

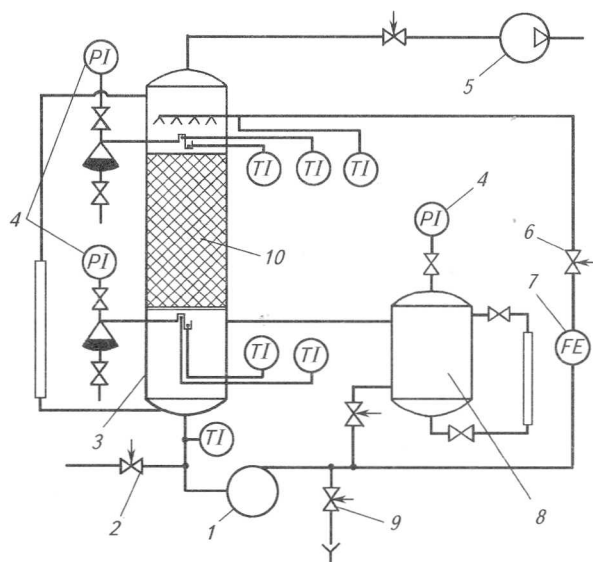


Рис. 2. Схема экспериментального стенда для исследования гидродинамического сопротивления орошаемой насадки:

- 1 – самовсасывающий насос; 2, 6, 9 – регулирующие вентили; 3 – корпус модельного аппарата; 4 – вакуумметр; 5 – вакуумный насос; 7 – расходомер; 8 – парогенератор; 10 – блок исследуемой насадки

и диаметром 0,22 м. Характер движения сред – противоток. Охлаждающая вода подается насосом в верхнюю часть аппарата через группу форсунок. Водяной пар, образовавшийся в парогенераторе, поступает в исследуемый аппарат ниже блока насадки.

Условия проведения эксперимента:

Температура конденсации t_k , °C	46,3...96,5
Температура нагрева воды в аппарате t_w , °C	3,5...27,4
Удельный массовый расход жидкости $W_{ж}$, кг/(с·м ²)	2,39...15,8
Удельный массовый расход пара $W_{п}$, кг/(с·м ²)	(8,55...12,60) · 10 ⁻²

В ходе эксперимента измеряли следующие параметры:

✓ температуру окружающего воздуха – лабораторным термометром с точностью 0,1 °C;

✓ объемный расход охлаждающей воды, подаваемой в аппарат, – электромагнитным расходомером ИР-51 (класс точности 1,0);

✓ температуру потоков на входе и выходе аппарата, в зондах, установленных сверху и снизу от блока насадки – медь-константановыми термопарами и вторичным преобразователем (цифровым комбинированным прибором Ш301-2);

✓ вакуум в контактном аппарате и парогенераторе – вакуумметром класса точности 0,4;

✓ барометрическое давление;

✓ мощность нагревателей парогенератора.

Средний коэффициент теплоотдачи в жидкой фазе при конденсации в аппарате определен по методу, основанному на учете процесса с переменной массой и числе единиц переноса. Результаты эксперимента обработаны в виде зависимости:

$$St_{ж} = 7,62 \cdot 10^{-4} Re_{ж}^{-0,5} Pr_{ж}^{-0,5}, \quad (1)$$

где $St_{ж} = \alpha_{ж} a \delta / (4c_{p_{ж}} W_{ж})$ – тепловой критерий Стантона;

$\delta = (v_{ж}^2 / 9,81)^{0,3333}$ – приведенная толщина стекающей пленки, м;

$\alpha_{ж}$ – средний коэффициент теплоотдачи в жидкой фазе, Вт/(м²·К);

$c_{p_{ж}}$ – удельная изобарная теплоемкость жидкости, кДж/(кг·К);

$W_{ж}$ – кинематический коэффициент вязкости жидкости, м²/с;

$Re_{ж} = 4W_{ж} / (a\mu_{ж})$ – критерий Рейнольдса для жидкости;

$\mu_{ж}$ – динамический коэффициент вязкости жидкости, Па·с;

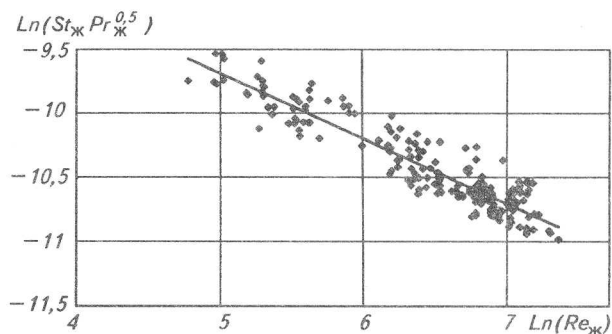


Рис. 3. Зависимость комплекса $Ln(St_{ж} \cdot Pr_{ж}^{-0,5})$ от $Ln(Re_{ж})$

$Pr_{ж} = \mu_{ж} c_{p_{ж}} / \lambda_{ж}$ – тепловой критерий Прандтля для жидкости;

$\lambda_{ж}$ – коэффициент теплопроводности для жидкости, Вт/(м·К).

Зависимость комплекса $Ln(St_{ж} \cdot Pr_{ж}^{-0,5})$ от $Ln(Re_{ж})$ представлена на рис.3. Среднеквадратичное отклонение экспериментальных данных по коэффициенту теплоотдачи 13 %. Максимальное отклонение не превышает 27 %.

Многими исследованиями установлен факт, что при конденсации водяного пара в отсутствие неконденсирующихся газов процесс лимитирует сопротивление в жидкой фазе. Для рассматриваемого процесса теория подобия дает общую форму критериального уравнения [3 –6]:

$$St_{ж} = f(Re_{ж}, Re_{п}, Pr_{ж}, We, Ku), \quad (2)$$

где $Re_{п}$ – критерий Рейнольдса для пара;

We – критерий Вебера;

Ku – критерий фазового перехода.

Эксперименты проводили при полной конденсации водяного пара. Влияние изменений его скорости на средний коэффициент теплоотдачи в диапазоне проведенных исследований не оказалось существенным. Поэтому критериальное уравнение (2) упрощено до формы уравнения (1).

Список литературы

1. *Виноградов Д.В., Плотников В.Т.* Результаты аэродинамического исследования насадки контактного конденсатора пароводяного теплового насоса // Известия Санкт-Петербургского государственного университета низкотемпературных и пищевых технологий. – СПб. 2003. № 1(5).
2. *Виноградов Д.В., Плотников В.Т.* Гидродинамическое исследование модели контактного аппарата с орошаемой регулярной насадкой // Вестник международной академии холода. – СПб. – М. 2003. № 4.
3. *Исаченко В.П.* Теплообмен при конденсации. – М.: Энергия, 1977.
4. *Кафаров В.В.* Основы массопередачи. – М.: Высшая школа, 1962.
5. *Рамм В.М.* Абсорбция газов. – М.: Химия, 1976.
6. *Шервуд Т., Пизфорд Р., Уилки Ч.* Массопередача / Пер. с англ. – М.: Химия, 1982.