

УДК 621.575.9

Исследование процесса вскипания перегретой воды в теплохолодильном агрегате

Канд. техн. наук Г.В. КУРИЛОВ, В.В. МОСТИЦКИЙ, С.И. ПЫЖОВ
ВНИПИЧерметэнергоочистка

A new type of a heat utilizing installation – a thermo-refrigerating unit – is considered, with the increased level of the removed heat of absorption and condensation and further use of these heats for heating on a higher temperature level.

Для более глубокого использования низкопотенциальных вторичных энергоресурсов (ВЭР) в Донецком филиале ВНИПИЧерметэнергоочистка был разработан новый тип теплоутилизационной установки – теплохолодильный агрегат (ТХА), в котором повышен температурный уровень отводимой теплоты абсорбции и конденсации (благодаря применению дополнительной ступени абсорбции) с дальнейшим использованием ее для отопления на более высоком уровне. Параллельно с производством холода вырабатывается дополнительное тепло на базе тепла, отбираемого от охлаждаемых объектов, со значительным сокращением расхода охлаждающей воды.

Для расчета аппаратов ТХА на экспериментальной установке были проведены исследования процесса вскипания перегретого раствора бромистого лития в струях. Принципиальная схема установки представлена на рис.1.

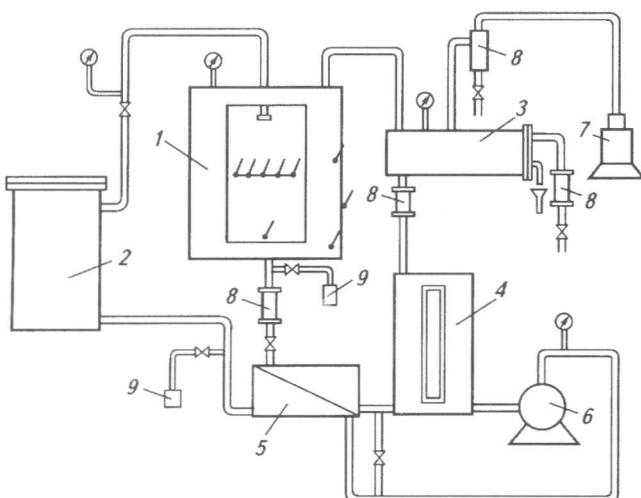


Рис. 1. Принципиальная схема экспериментальной установки:

- 1 – камера вскипания; 2 – нагреватель;
- 3 – конденсатор; 4 – бак; 5 – теплообменник; 6 – насос;
- 7 – вакуум-насос; 8 – мерные сосуды; 9 – отборники

Перед исследованием процесса вскипания раствора были проведены аналогичные исследования перегретой воды с относительно невысоким перегревом, которые и сами по себе представляют интерес из-за отсутствия надежных методик расчета испарителей для данных режимов.

В этих исследованиях предусматривался замер тех параметров (температуры, давлений, расходов потоков), которые дадут возможность получить величины, входящие в обобщающие формулы: параметр испарения σ ; индекс испарения n ; критерии Re , Pr , Nu .

В соответствии с теорией протекания процесса из критериального уравнения $Nu = f(Re, Pr)$ определяют α – коэффициент пропорциональности, характеризующий передачу тепла от жидкой к паровой фазе. В дальнейшем определяют параметр испарения σ , индекс испарения n и коэффициент испарения K_n .

Перед испытаниями проводили тарировку насадок и определение коэффициента расхода μ на экспериментальном участке, а также зависимости расхода V (m^3/s) от диаметра, длины насадки, параметров и свойств истекающей воды по формуле Бернуlli

$$V = \mu f \sqrt{2(p_1 - p_0) / \rho}, \quad (1)$$

где μ – коэффициент расхода;

f – площадь сечения насадки, m^2 ;

p_1 и p_0 – давления на выходе из насадки и в камере, Па;

ρ – плотность истекающего потока, kg/m^3 .

Исследования по истечению воды из насадок проводили с целью выявления применимости известных зависимостей для определения расходов.

Экспериментальные данные показывают, что при повышении перепада давлений Δp расход перегретой воды снижается по сравнению с расходом холодной воды. Это объясняется уменьшением плотности потока при вскипании, определение которой затруднительно.

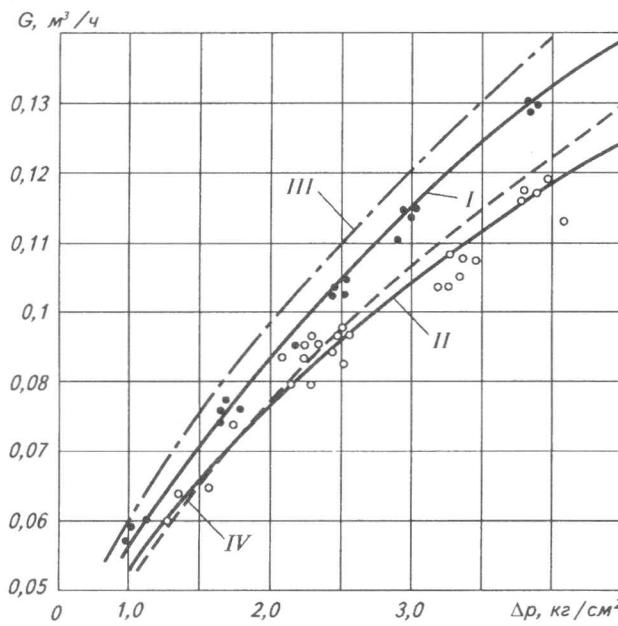


Рис. 2. Зависимость расхода воды от перепада давления при истечении через насадку $d_c = 1,5 \text{ мм}$ ($l/d = 2$):
 I – экспериментальная кривая для холодной воды;
 II – экспериментальная кривая для перегретой воды;
 III – расчетная кривая для холодной воды;
 IV – расчетная кривая для перегретой воды

Для расчета расходов перегретой воды при истечении через насадку рекомендуется формула

$$V_{\text{г.в}} = \varepsilon \cdot V_{\text{x.в}} \mu f \sqrt{2(p_1 - p_0) / \rho}, \quad (2)$$

где ε – коэффициент сжатия струи за счет частичного вскипания жидкости;

$V_{\text{x.в}}$ – расход холодной воды, подсчитанный по (1).

На рис. 2 приведены зависимости расхода холодной и перегретой воды при истечении через насадку с $l/d = 2$. Отклонение экспериментальных кривых от теоретических незначительно (до 5 %).

Были проведены исследования по изучению процесса вскипания перегретой воды в струях, его механизма и закономерностей, а также определены оптимальные размеры распылителей перегретой воды.

Аналитически определить коэффициент теплопередачи в этом случае, как и общую поверхность испарения, трудно.

Равновесное состояние в струе вскипающей жидкости характеризуется коэффициентом доли равновесия $\beta = 1$.

$$\beta = (T_1 - T_i) / (T_1 - T_h), \quad (3)$$

где T_1 , T_h , T_i – температуры жидкости перед входом в камеру, насыщения при давлении в камере и текущая в точке замера соответственно.

Опытные данные, полученные на экспериментальной

установке, проверяли по зависимости, полученной в работе *:

$$\beta = 1 - e^{-\sigma}, \quad (4)$$

где

$$\sigma = n L, \quad (5)$$

L – длина струи, м.

В то же время

$$\sigma = \alpha S / (W_c c), \quad (6)$$

где S – поверхность испарения, м^2 ;

W_c – секундный расход через сечение насадки, $\text{кг}/\text{с}$;
 c – теплоемкость жидкости, $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$.

Для потока в виде метастабильной струи коэффициент пропорциональности α для нераспавшейся струи определяется из уравнения

$$Nu = 0,023 Re^{0,8} Pr^{0,4}, \quad (7)$$

которое было проверено в данной работе по опытным данным, для чего сравнивались α , вычисленные по формулам (6) и (7). При определении поверхности испарения для формулы (6) приняли, что диаметр струи равен внутреннему диаметру насадки d_c . Критерии Нуссельта, Рейнольдса и Прандтля вычисляли по формулам:

$$Nu = \alpha d_c / \lambda; Re = v_c d_c / \nu \text{ и } Pr = v c \rho / \lambda,$$

где d_c – диаметр насадки, м;

λ – коэффициент теплопроводности, $\text{Дж}/(\text{м}\cdot\text{с}\cdot\text{К})$;

v_c – скорость истечения струи, $\text{м}/\text{с}$;

ν – кинематическая вязкость, $\text{м}^2/\text{с}$;

c – теплоемкость, $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$;

ρ – плотность, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Различие значений α , полученных по формулам (6) и (7), не превышало 15 %, что говорит о хорошем представлении процесса испарения нераспавшейся струи формулой (7).

Исследования, проведенные на экспериментальной установке, позволили получить опытные значения β по длине струи, выявить закон изменения коэффициента испарения K_i и индекса испарения n в зависимости от изменения начального перегрева воды T_1 и давления в камере p_0 .

Для испарения с поверхности распавшейся струи определяли значение β по формуле (3), затем σ и n .

Из формулы (6) получали значение произведения αS , из которого находили поверхность испарения S , приняв для всех опытов α равным его значению при испарении с поверхности нераспавшейся струи. S – величина условная, но так как она взята из достоверной величины αS , то может служить мерой протекания процесса.

* Porteous S.A., Muncaster R.A. Model for equilibration rates in flashing Flow through open channels, nozzles and short tubes // Brit. Chem. Eng. 1971, vol. 16, № 1.

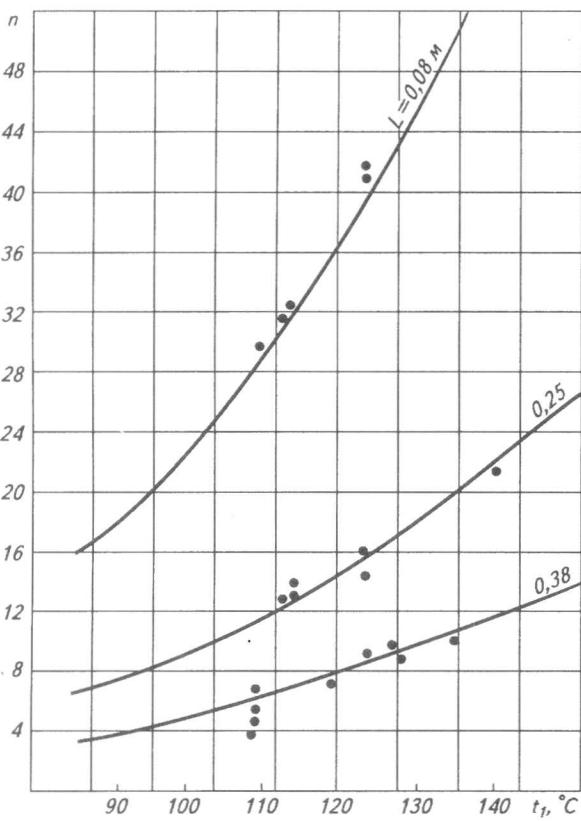


Рис. 3. Зависимость индекса испарения n от температуры перегрева при $p_0 = \text{const}$

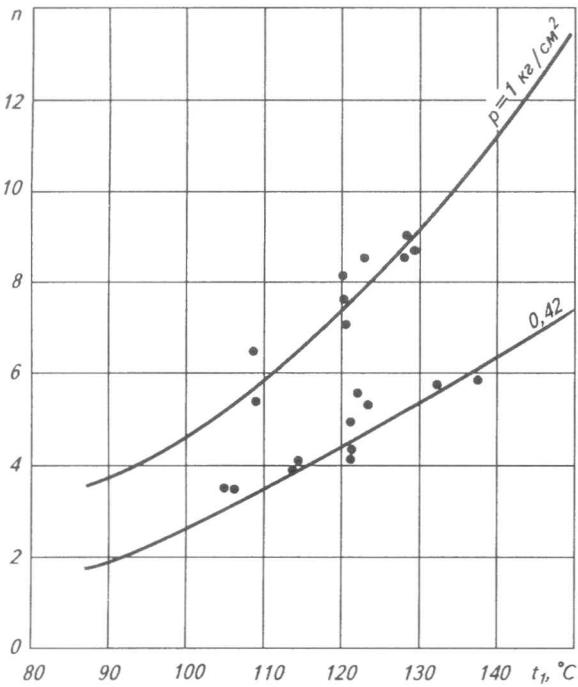


Рис. 4. Зависимость индекса испарения n от температуры перегрева при $L = \text{const}$

Индекс испарения подсчитывали по формуле $n = V/L_i \ln[(T_1 - T_i)/(T_1 - T_h)]$,

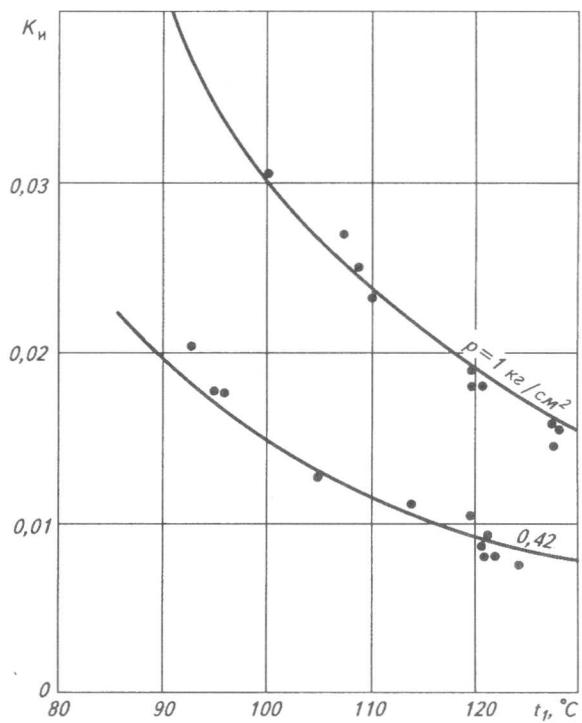


Рис. 5. Зависимость коэффициента испарения K_u от температуры перегрева при различных давлениях в камере

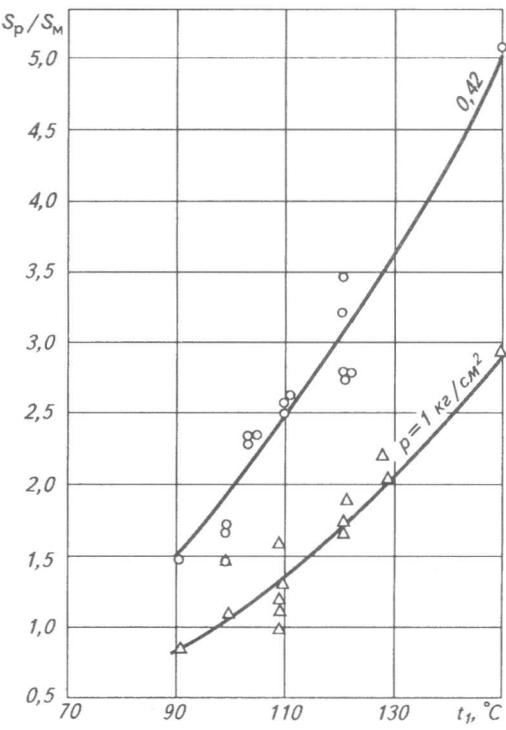


Рис. 6. Зависимость отношения поверхностей испарения S_p/S_m от температуры перегрева при различных давлениях в камере

где L_i , T_i – расстояние от среза насадки до точки замера в струе и температура в этой же точке.

В результате обработки опытных данных для процесса испарения воды из распавшихся струй перегретой воды получена формула для определения индекса испарения:

$$n = 0,1337 \cdot 10^{-4} \cdot p_0^{0,6} T_i^{-1,02}, \quad (8)$$

где p_0 – давление в камере, кг/см²;

T_i – температура перегрева, °C.

Коэффициент множественной корреляции для этой формулы равен 0,987.

Значение индекса испарения зависит от длины струи L .

На рис.3 приведена зависимость индекса испарения $n = f(T, L)$ при $p_0 = \text{const}$, а на рис. 4 $n = f(T, p_0)$ при $L = \text{const}$ [аппроксимирующие кривые по формуле (8) и опытные точки для тех же условий].

Для коэффициента испарения K_i получена следующая формула:

$$K_i = 5044 p_0^{0,79} T_i^{-2,6} \quad (9)$$

с коэффициентом множественной корреляции 0,92.

На рис.5 приведены кривые, построенные по формуле (9), и нанесены опытные точки.

В связи с тем что при расчетах необходимо знание

величины поверхности испарения струи, была проведена обработка опытных данных с целью получения зависимости поверхности испарения струи от температуры перегрева и давления в камере. Получена следующая зависимость:

$$S_p/S_m = 16,65 \cdot 10^{-6} T_i^{2,41} p_0^{-0,64} \quad (10)$$

с коэффициентом множественной корреляции 0,9.

Здесь S_p – поверхность испарения распавшейся струи;

S_m – поверхность испарения метастабильной струи.

Эта зависимость действительна для случая истечения перегретой воды из насадок диаметром 1,5 мм. Возможность применения формулы для больших диаметров требует экспериментальной проверки.

На рис.6 приведена зависимость $S_p/S_m = f(T_i, p_0)$ по формуле (10) с нанесенными опытными точками.

Все полученные зависимости имеют высокие коэффициенты корреляции, и поэтому можно считать, что все расчеты, проведенные с применением вышеприведенных формул, правильно описывают процессы и позволяют производить расчеты аппаратов вскипания перегретой воды в струях.