

УДК 621.575.9

Исследование процесса вскипания перегретого раствора бромистого лития

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

The process of boiling of superheated lithium bromide solution as a jet is experimentally studied. On the basis of experimental data a criterion equation for the calculation of the process of water evaporation from the jets of the solution and the expression for the coefficient of evaporation are obtained.

Важным источником экономии топлива является использование низкопотенциальных вторичных энергоресурсов (ВЭР): тепла отходящих дымовых газов с температурой 300 °С и менее; тепла охлаждающей воды; тепла, теряемого поверхностями металлургических агрегатов; тепла вытяжных систем промвентиляции и т.д.

В Донецком филиале «ВНИПИчерметэнергоочистка» был разработан новый тип теплоутилизационной установки – теплохолодильный агрегат (ТХА), в котором повышен температурный уровень отводимых теплот абсорбции и конденсации благодаря применению дополнительной ступени абсорбции с дальнейшим использованием отводимого от серийных машин АБХМ-2500 и АБХМД-2500 тепла для целей отопления на более высоком температурном уровне.

Этот агрегат позволяет существенно повысить использование низкопотенциальных ВЭР, так как параллельно с производством холода вырабатывается тепло на базе отбираемого от охлаждаемых объектов, причем со значительным сокращением расхода охлаждающей воды.

В ТХА может использоваться тепло отходящих дымовых газов с температурой 250 °С и выше.

Регенерация перегретого абсорбента осуществляется при его ступенчатом вскипании с передачей теплоты конденсации выпаров ступеней вскипания слабому раствору абсорбента, направляемому на регенерацию.

Создание ТХА потребовало разработки методики расчета аппаратов.

Для расчета большинства аппаратов были применены известные зависимости. Однако при расчете многоступенчатого регенератора раствора по известной методике [1] получались аппараты больших габаритов и, естественно, большой металлоемкости.

Для снижения металлоемкости аппаратов и улучшения разделения водяного пара целесообразно регенерацию раствора в ступенях производить в струях.

Процесс вскипания перегретого раствора бромистого лития в струях до настоящего времени не был изучен. Для его исследования была создана экспериментальная

установка, принципиальная схема которой представлена на рис. 1.

Схемой измерения предусматривался замер температуры, давлений, расходов, концентрации потоков, т. е. тех параметров, 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 $Nu = f(Re, Pr)$ определяется α – коэффициент пропорциональности, характеризующий передачу тепла от жидкой к паровой фазе. В дальнейшем определяются параметр испарения σ , индекс испарения n и коэффициент испарения $K_{\text{и}}$.

Для проверки принятых зависимостей, методики обработки экспериментальных данных и правильности принятой схемы измерений первоначально были проведены опыты на воде.

Перед испытаниями проводились тарировка насадок и определение коэффициентов расхода μ эксперимен-

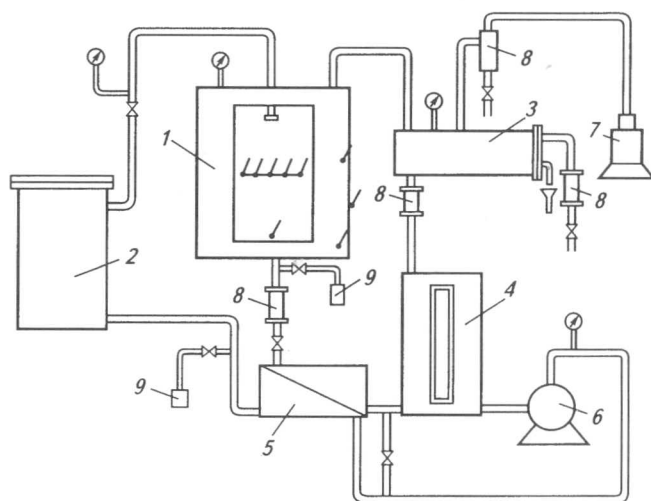


Рис. 1. Принципиальная схема экспериментальной установки:

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

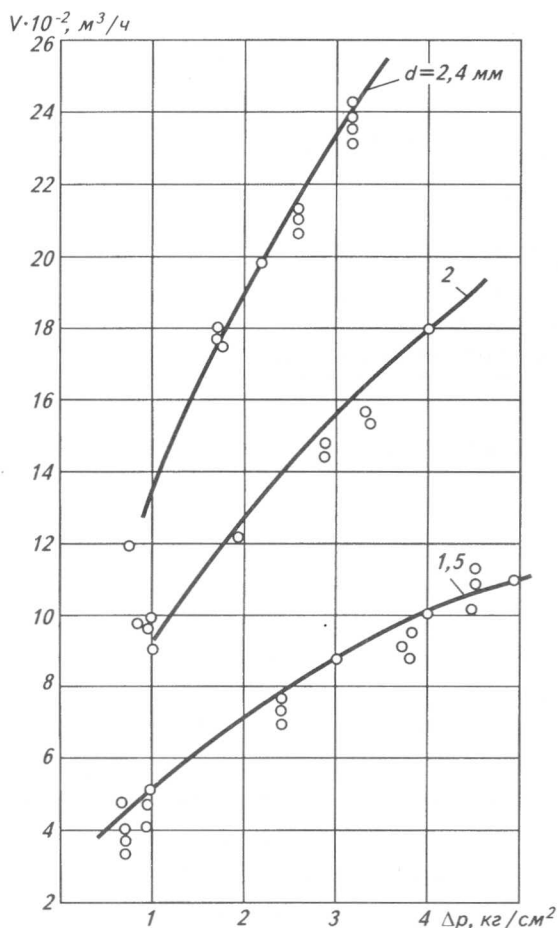


Рис. 2. Зависимость расхода холодного раствора LiBr от Δp при длине насадки $l = 1,0$ мм и диаметре сопла $d = 1,5; 2; 2,4$ мм

тальных участков и зависимости расхода от диаметра, длины насадки и свойств истекающих холодных жидкостей (воды и раствора при различных его концентрациях).

На рис. 2 приведена зависимость расхода холодного раствора ($t = 30 \dots 40$ °С) от перепада давлений при истечении через насадки различных диаметров с острой кромкой, построенная по уравнению Бернулли

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

где v – расход жидкости, м³/с;

f – площадь сечения насадки, м²;

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

ρ – плотность истекающего потока, кг/м³.

На рис. 2 также нанесены опытные точки. Отклонение от расчетной кривой составило не более 6 %.

На рис. 3 приведена такая же зависимость для различных длин насадок ($d = 1,5$ мм) (опытные точки) и кривая по уравнению (1). Как видно из рис. 3, для узкого диапазона изменения линейного размера ($l = 1; 3; 8$ мм) влияние его на расходные характеристики хо-

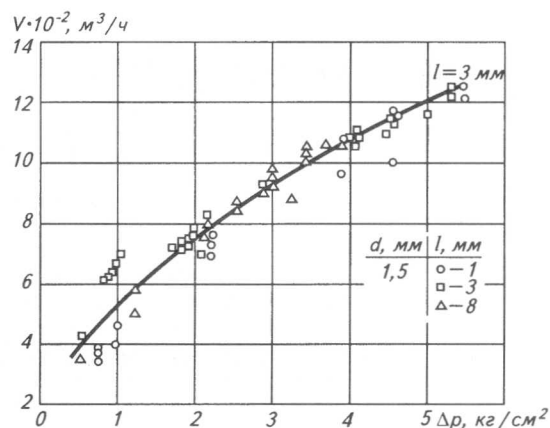


Рис. 3. Зависимость расхода холодного раствора LiBr от Δp при $d = 1,5$ мм и $l = 1; 3; 8$ мм

лодного раствора не обнаруживается.

Результаты исследования обобщались зависимостью, рекомендованной Огасаварой [2]:

$$v/v_0 = f(\Delta t, l/d), \quad (2)$$

где v_0 – теоретический расход, подсчитанный по формуле (1);

Δt – разность температур на выходе из сопла и в камере вскипания, °С.

В результате обработки опытных данных эта зависимость получена в виде

$$v/v_0 = 2,62 (l/d)^{0,1} \Delta t^{-0,335}. \quad (3)$$

Коэффициент множественной корреляции для этой формулы равен 0,63.

На рис. 4 приведены зависимости относительного расхода раствора бромистого лития от перегрева, рассчитанные по (3) для различных линейных размеров, и нанесены опытные точки.

Зависимость (3) рекомендуется для подбора устройств истечения ступеней вскипания регенераторов бромисто-литиевых агрегатов.

Одной из целей исследований было определение критериальной зависимости вида

$$Nu = \alpha Re^n Pr^m.$$

Обработка опытных данных велась с целью определения коэффициента α .

Установление равновесного состояния в струе вскипающей жидкости характеризуется тем, что коэффициент доли равновесия $\beta = 1$.

$$\beta = (T_1 - T_i) / (T_1 - T_n), \quad (4)$$

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

В работе [3] была получена зависимость

$$\beta = 1 - e^{-\sigma}, \quad (5)$$

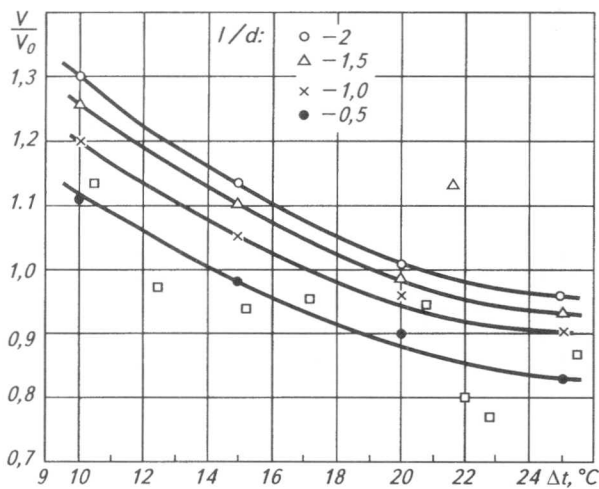


Рис. 4. Зависимость относительного расхода раствора от перегрева при различных l/d

где $\sigma = nL$, (6)

L – длина струи, м.

В то же время

$$\sigma = \alpha S / (w_c / c), \quad (7)$$

где S – поверхность испарения, m^2 ;

w_c – секундный расход через сечение насадки, kg/c ;

c – теплоемкость жидкости, $Dж/(кг·К)$.

Из уравнения (5) определяли параметр испарения σ , подсчитывали поверхность нераспавшейся струи и по уравнению (7) определяли коэффициент пропорциональности α .

В результате исследования получено следующее уравнение для расчета процесса испарения воды из нераспавшихся струй водного раствора бромистого лития:

$$Nu = 3,41 \cdot 10^{-10} Re^{2,6} Pr^{0,7}. \quad (8)$$

Коэффициент множественной корреляции – 0,85.

Для случая испарения воды с поверхности распавшихся струй графическая зависимость $Nu = f(Re, Pr)$ приведена на рис. 5.

Для определения индекса испарения получена формула

$$n = 5,04 \cdot 10^{-19} p_0^{-0,49} \Delta t^{0,55} \xi^{-11} d^{0,36}, \quad (9)$$

где p_0 – давление в камере вскипания, kg/cm^2 ;

Δt – разность температур на входе и в камере, $°C$;

ξ – концентрация раствора, %;

d – диаметр насадки, м.

Коэффициент множественной корреляции – 0,90.

На рис. 6 приведена зависимость индекса испарения $n = f(p_0, \Delta t)$ при $L = 0,1m$; $d = 0,0015m$ и $\xi = 60\%$, а на рис. 7 – зависимость $n = f(\Delta t, \xi)$ при тех же L и d и $p_0 = 1 kg/cm^2$ и нанесены опытные точки.

Важной характеристикой процесса является величина

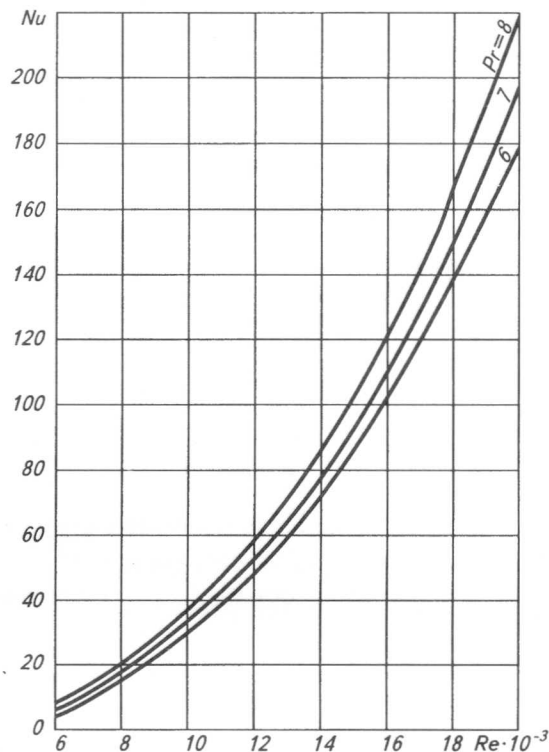


Рис. 5. График зависимости $Nu = f(Re, Pr)$

на выпаренной из раствора воды, которая определяется коэффициентом испарения

$$K_{и} = D / (S \Delta t), \quad (10)$$

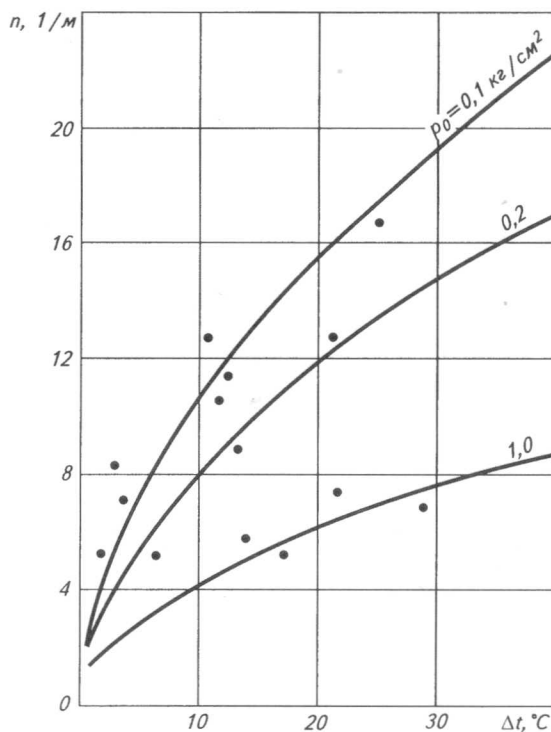


Рис. 6. Зависимость индекса испарения от разности температур на входе и в камере

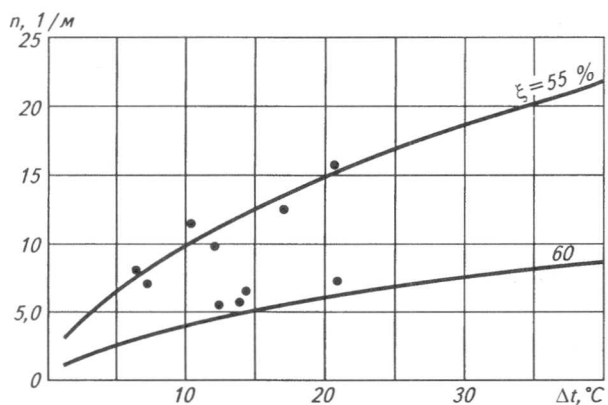


Рис. 7. График зависимости $n = f(\Delta t, \xi)$ при давлении в камере $p_0 = 1 \text{ кг/см}^2$

где D – количество испарившейся воды в струе, кг/с;
 S – поверхность испарения струи, м^2 .

Опытные данные были обработаны в виде зависимости

$$K_n = f(\Delta p, t_1).$$

В результате получена формула

$$K_n = 1,47 \cdot 10^6 t_1^{-3,78} \Delta p^{2,5}, \quad (11)$$

которая показала существенную зависимость коэффициента от перепада давления Δp и температуры раствора на входе в камеру t_1 .

На рис. 8 приведена зависимость коэффициента испарения K_n от температуры раствора t_1 .

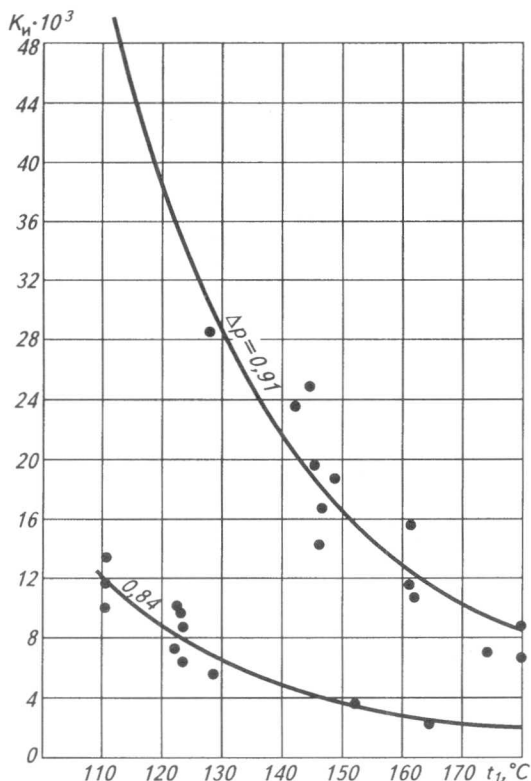


Рис. 8. График зависимости коэффициента испарения K_n от температуры раствора t_1 для различных Δp

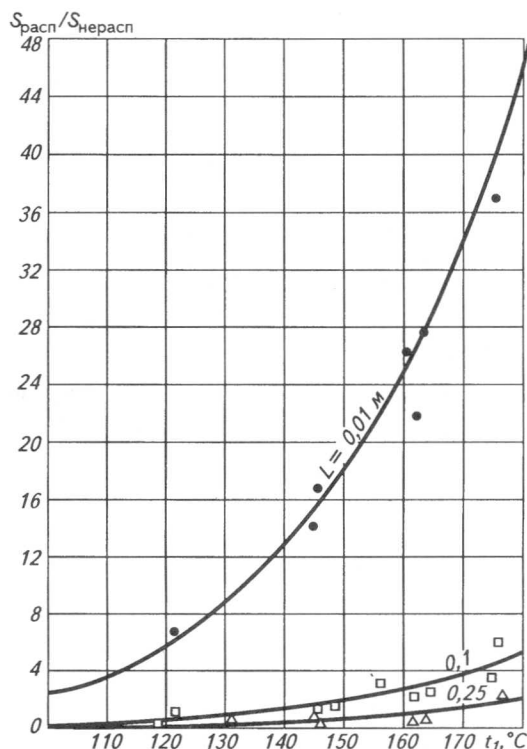


Рис. 9. График зависимости отношения поверхностей испарения от температуры раствора при различной длине струи для $\Delta p = \text{const}$

Было определено соотношение площадей поверхностей испарения распавшейся и нераспавшейся струй, необходимое при расчетах испарения воды из перегретого раствора бромистого лития в виде

$$S_{\text{расп}}/S_{\text{нерасп}} = f(\Delta p, t_1, L).$$

После обработки опытных данных получена следующая аналитическая зависимость:

$$S_{\text{расп}}/S_{\text{нерасп}} = 9,33 \cdot 10^{-13} t_1^{5,2} L^{-0,95}. \quad (12)$$

Эта формула проверена в диапазоне $\Delta p = 0,5 \dots 2 \text{ кг/см}^2$ и $d = 1,5 \dots 2,5 \text{ мм}$.

На рис. 9 приведены кривые этих зависимостей и нанесены опытные точки. Для формулы (12) коэффициент множественной корреляции равен 0,9.

Все полученные зависимости имеют высокие коэффициенты корреляции, и поэтому можно считать, что они правильно описывают процессы и позволяют производить расчеты аппаратов вскипания перегретого раствора в струях.

Список литературы

1. Курилов Г.В. Использование тепла отходящих газов для производства холода с применением ступенчатой регенерации раствора: Дис... канд. техн. наук. – Донецк, 1976.
2. Ocasawara H. 4th Report, Experiments on Saturated Water Discharging through Long Tubes. «Bulletin ASME» 1969.V 12, N52.
3. Porteous S. A., Muncaater R. A. model for equilibration rates in flashing flow through open channels, nozzles and short tubes. Brit. Chem.Eng. 1971, 16, N1.