

**В.М. Мясоedenков,
Г.А. Носов
МИТХТ им. М.В. Ломоносова**

ВЫПАРНАЯ КРИСТАЛЛИЗАЦИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПАРОВОГО ИНЖЕКТОРА

УДК66.065.5

Выполнен анализ эффективности использования парового инжектора в установке выпарной кристаллизации. Показано, что применение парового инжектора позволяет снизить энергетические затраты на проведение процесса выпарной кристаллизации.

Повторное использование вторичного пара с предварительным сжатием его в компрессоре или инжекторе широко практикуется в процессах выпаривания [1]. Установки такого типа носят соответственно название: или выпарные аппараты с полным тепловым насосом, или выпарные аппараты с частичным тепловым насосом. "Полный" или "частичный" в названии установки обусловлены полным или частичным повторным использованием вторичного пара. Очевидно, что такой способ экономии первичного греющего пара может быть реализован и в процессах изотермической (выпарной) кристаллизации.

Ранее [2] было показано преимущество выпарной кристаллизации с полным тепловым насосом по сравнению с обычной выпарной кристаллизацией (без теплового насоса). В настоящей работе проведем сравнительный анализ работы двух установок изотермической кристаллизации: с использованием парового инжектора и без использования последнего.

Принципиальные схемы установок показаны на рис.1, а. Выпарная кристаллизационная установка непрерывного действия работает следующим образом. Поток исходного раствора F с концентрацией x_F , теплоемкостью c_F и температурой t_{F0} подается в трубное пространство подогревателя 2, где раствор нагревается до температуры t_F вторичным паром давления p . Нагретый таким образом исходный раствор поступает в кристаллизатор 1, в межтрубное пространство которого подается греющий

пар давления p_n . Образовавшийся вторичный пар с температурой θ , в количестве W , направляется: частично в подогреватель исходного раствора; частично в поверхностный конденсатор 4. В поверхностный конденсатор подается в качестве холодильного агента вода расходом G_e , с температурой t_e' . Вода, нагретая в конденсаторе до температуры t_e'' , выводится из процесса. Поток кристаллов в смеси с потоком маточника отводится из кристаллизатора и направляется на сепарацию в фильтр 3. В результате процесса фильтрования получают: поток кристаллов K с концентрацией вещества x_K , теплоемкостью c_K и температурой t ; и поток маточника M с концентрацией вещества x_M , теплоемкостью c_M и температурой t .

Использование инжектора позволяет упростить схему установки (рис. 1, б). В этом случае обогрев выпарного аппарата производится первичным греющим паром высокого давления вместе с частью вторичного пара после смешения его с первым в паровом инжекторе 6. Количество вторичного пара, увлекаемого греющим паром высокого давления в межтрубное пространство выпарного аппарата, определяется коэффициентом инжекции u . Остаток вторичного пара направляется на подогрев исходного раствора. В такой схеме нет поверхностного конденсатора, а, следовательно, и нет центробежного насоса 5 для подачи охлаждающей воды в конденсатор.

С целью упрощения сопоставления рассматриваемых установок положим, что в той и другой установке одинакова доля потока вторичного пара, которая может быть использована для подогрева исходного раствора, а поступающий на кристаллизацию раствор имеет одинаковую температуру раствора t_F .

Для энергетического сопоставления схем воспользуемся коэффициентом относительного расхода топлива ϵ , который представляет собой отношение полных расходов топлива в обычной схеме и в схеме с тепловым насосом [3].

$$\epsilon = B_1/B_2 \quad (1)$$

где B_1 – расход топлива в обычной схеме; B_2 – расход топлива в схеме с тепловым насосом.

Величины B_1 и B_2 соответственно равны:

$$B_1 = b_1 Q_1 + b_3 N_n \quad (2)$$

$$B_2 = b_2 Q_2. \quad (3)$$

При этом: b_1 – удельный расход топлива, затрачиваемого на производство единицы теплоты, подводимой водяным паром давления p_n в кристаллизаторе; b_2 – удельный расход топлива на единицу теплоты, подводимой водяным паром давления p_0 в инжекторе; b_3 – удельный расход топлива на выработку электроэнергии с учетом потерь в электросети; Q_1 – количество тепла, подведенное в греющую камеру кристаллизатора с греющим паром, равное произведению $D_n(h_n - i_k)$; Q_2 – количество тепла, внесенное в греющую камеру с первичным греющим паром в схеме с тепловым насосом, равное произведению $D_0(h_0 - i_k)$; N_n – мощность электродвигателя центробежного насоса, предназначенного для подачи воды в конденсатор вторичного пара обычной схемы.

Эффективность теплового насоса часто оценивают коэффициентом преобразования ϕ [4], представляющий собой отношение теплового потока Q_1 , подведенного к нагреваемому объекту (кристаллизатору), к мощности воздействия первичного греющего пара на рабочее тело (вторичный пар), Q_2 . Используя коэффициент ϕ , зависимость между тепловыми потоками Q_1 и Q_2 можно представить как:

$$Q_2 = \frac{Q_1}{\phi} \quad (4)$$

Мощность двигателя центробежного насоса может быть также выражена через мощность Q_1 . В самом деле, указанная мощность рассчитывается по формуле

$$N_n = \frac{HG_g g}{\eta_n} \quad (5)$$

где H – потребный напор; G_g – расход охлаждающей воды; η_n – коэффициент полезного действия насосной установки.

В свою очередь, расход охлаждающей воды может быть найден из уравнения теплового баланса конденсатора:

$$G_g = \frac{D_0 u(i - i_{k2})}{c_g(t_g'' - t_g')} \quad (6)$$

где i – энтальпия вторичного пара; i_{k2} – энтальпия конденсата вторичного пара; D_0 – расход первичного греющего пара высокого давления; u – коэффициент инжекции, представляющий собой отношение потоков $(W - E)/D_0$; c_g – теплоемкость воды.

С учетом уравнений материального баланса инжектора и теплового баланса кристаллизатора выразим D_0 через тепловой поток Q_1 .

$$D_n = D_0(1 + u) \quad (7)$$

$$Q_1 = D_n(h_n - i_k) \quad (8)$$

$$D_0 = \frac{Q_1}{(h_n - i_k)(1 + u)} \quad (9)$$

В результате совместного решения уравнений (5), (6), (9) получим:

$$N_n = \frac{HgQ_1 u(i - i_{k2})}{\eta_n(h_n - i_k)(1 + u)c_g(t_g'' - t_g')} \quad (10)$$

Рассмотрев совместно уравнения (1) – (4), (10) и обозначив отношение удельных расходов топлива b_1/b_2 через m , получим:

$$\epsilon = \phi \left[m + \frac{b_e Hgu(i - i_{k2})}{b_2 \eta_n (h_n - i_k)(1 + u)c_g(t_g'' - t_g')} \right] \quad (11)$$

Коэффициент преобразования может быть найден по формуле (4) с учетом выражений (7), (8) и (9).

$$\phi = \frac{(h_n - i_k)(1 + u)}{(h_0 - i_k)} \quad (12)$$

Основным параметром парового инжектора является коэффициент инжекции, u , расчет которого выполняют по формуле:

$$u = \varphi_1 \varphi_2 \varphi_3 \sqrt{\frac{h'_{ad}}{h''_{ad}}} - 1 \quad (13)$$

где φ_1, φ_2 и φ_3 - коэффициенты потери скорости пара в инжекторе на участках, соответственно, - сопла, камеры смешения и камеры сжатия [5]. Формула содержит отношение адиабатических перепадов энтальпий. В числителе этого отношения содержится адиабатический перепад энтальпий на участке сопла, h'_{ad} . В знаменателе отношения - адиабатический перепад энтальпий на участке камеры сжатия, h''_{ad} .

Увеличение степени сжатия вторичного пара за счет изменения давления p_n ,

$n = \frac{p_n}{p}$, ведет к уменьшению отношения адиабатических перепадов энтальпий в инжекторе. Коэффициент инжекции при этом уменьшается. С другой стороны уменьшение степени сжатия ограничено минимальной полезной разностью температур кристаллизатора

$$\Delta_{\min} = t_n - \theta - \delta_t \quad (14)$$

где t_n - температура греющего пара в насыщенном состоянии; δ_t - температурная депрессия кипящего раствора.

С целью определения характера влияния степени сжатия вторичного пара, отношения удельных расходов топлива m , напора центробежного насоса обычной схемы кристаллизации на величины v, φ и φ_{cp} проведем численный эксперимент. В качестве объекта исследования рассмотрим процесс кристаллизации NaCl из водного раствора. Давление первичного пара p_0 зафиксируем на уровне 1,18 МПа. Инжектирующий пар подается в камеру смешения инжектора в перегретом состоянии. Температура инжектирующего (первичного) пара t_0 равна 300 °С. Раствор

поваренной соли кипит в кристаллизаторе при атмосферном давлении $p = 0,1013$ МПа. Концентрация соли в растворе составляет 28,5%. Температура кипения раствора равна 108,7 °С. Минимальную полезную разность температур примем равной 2 °С. Удельный расход топлива на выработку электроэнергии с учетом потерь в электросети, b_e , составляет 198,6 кг/ГДж [3].

Отметим некоторую неполноту исходных данных. В литературе отсутствует дифференциальная оценка удельного расхода топлива на единицу теплоты подводимой водяным паром b_2 в зависимости от давления этого пара. Так, в работе Янговского [3] приводится значение $b_2 = 41,8$ кг /ГДж без указания давления пара. С целью преодоления неполноты исходных данных положим, что в ходе эксперимента отношение $\frac{b_1}{b_2} = m$ принимает следующие значения: 1; 0,6; а $b_2 = 41,8$ кг/ГДж.

Об эффективности использования парового инжектора в установке выпарной кристаллизации судили по величине отношения полных расходов топлива в обычной схеме и в схеме с паровым инжектором, v . При $v > 1$ схема с паровым инжектором имеет преимущество.

Результаты расчета представлены на рисунках 2,3 и 4.

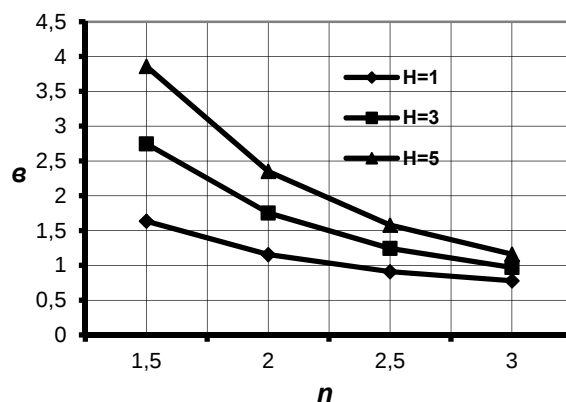


Рис. 2. Влияние степени сжатия вторичного пара на эффективность использования инжектора в установке изотермической кристаллизации при $m = 0,6$.

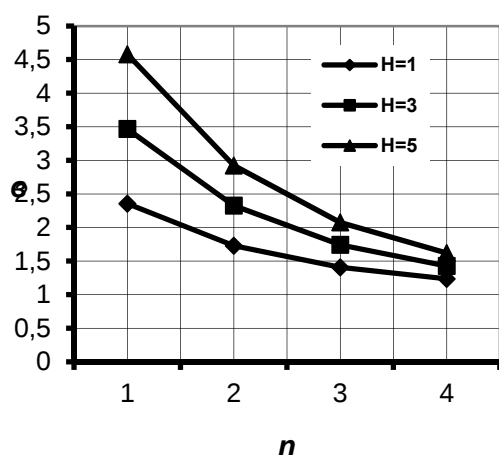


Рис. 3. Влияние степени сжатия вторичного пара на эффективность применения инжектора в установке изотермической кристаллизации при $m = 1$.

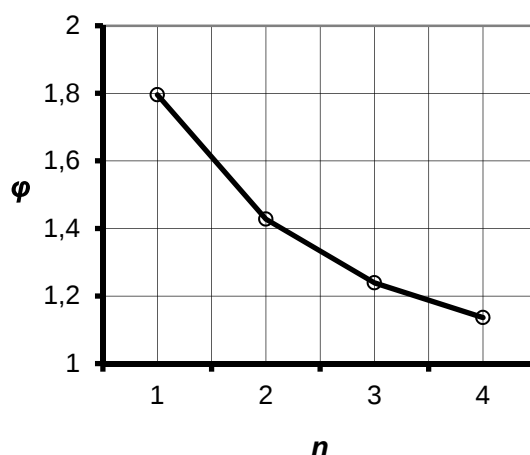


Рис. 4. Влияние степени сжатия вторичного пара на коэффициент преобразования энергии

Анализ полученных результатов показывает, что эффективность использования парового инжектора повышается: с уменьшением степени сжатия вторичного пара, n ; с увеличением отношения удельных расходов топлива в обычной схеме и в схеме с тепловым насосом, m ; с увеличением потребного напора для подачи охлаждающей

воды в конденсатор вторичного пара схемы без теплового насоса, H .

Практически на всем диапазоне исследованных параметров процесса установка выпарной кристаллизации с паровым инжектором экономически предпочтительнее установки, не снабженной паровым инжектором.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Н.И. Гельперин. Основные процессы и аппараты химической технологии. М.: Химия, 1981, 812 с.
2. Г.А. Носов, В.М. Мясоedenков, Н.Л. Бангура. Вакуумная кристаллизация с тепловым насосом. Моск. гос. академия тонк. хим. техн. – М., 2000, деп. в ВИНТИ. №3027-B00 от 28.11.2000.
3. Е.И. Янговский, Л.А. Левин. Промышленные тепловые насосы. М.: Энергоавтомиздат, 1989, 128 с.
4. А.В. Четкин, Н.А. Занемонец. Теплотехника. М.: Высшая школа, 1986, 344 с.
5. И.И. Чернобыльский. Машины и аппараты химических производств. М.: Машиностроение, 1975, 454 с.