

## Экономическая эффективность рекуперации теплоты конденсата паровых теплообменников путем сжатия вторичного пара

Печенегов Ю. Я., доктор техн. наук, Косов А. В., инж., Жибалов А. Ю.

Энгельсский технологический институт (филиал) Саратовского государственного технического университета им. Гагарина Ю. А.

Выполнен расчетный анализ экономической эффективности сжатия вторичного пара, уходящего из теплообменника, с помощью струйного и механического (винтового) компрессоров. Показана экономическая целесообразность использования теплоты вторичного пара после его сжатия. С помощью критерия годовых приведенных затрат получено выражение для расчета экономической эффективности использования вторичного пара. Найдены оптимальные режимы работы компрессоров.

**Ключевые слова:** паровой теплообменник, конденсат, вторичный пар, компрессор, сжатие, приведенные затраты, экономическая эффективность.

На промышленных предприятиях, где в качестве греющего теплоносителя используется водяной пар, преимущественно применяются пароконденсатные системы открытого типа. В таких системах выходящий из паровых теплообменников конденсат с температурой насыщения, соответствующей давлению греющего пара, проходит через конденсатоотводчики, где его давление снижается до значения, близкого или равного атмосферному давлению. При этом из него выделяется вторичный пар, количество которого увеличивается с ростом давления  $p_1$  исходного греющего пара и, например, при  $p_1 = 1$  МПа составляет 0,15 кг на 1 кг греющего пара. Из-за низкой температуры конденсации (около 100 °С) вторичный пар часто не находит применения на предприятиях и выпускается через свечи конденсатных баков в атмосферу. В этом случае с вторичным паром теряется теплота, которая, например, при  $p_1 = 1$  МПа составляет 43 % теплоты выпускаемого из теплообменников конденсата.

Исключить данные потери возможно путем сжатия вторичного пара от его давления  $p_2$  до давления  $p_1$  греющего пара с тем, чтобы тепловой ресурс вторичного пара мог быть вновь использован в паровом теплообменнике. Такого рода утилизация теплоты конденсата по наиболее предпочтительной внутренней схеме может быть реализована с применением струйного и механического (например, винтового) компрессоров (рис. 1). Для работы струйного компрессора нужно располагать потоком инжектирующего пара от источника давлением  $p_0$ , повышенным по отношению к давлению  $p_1$  греющего пара. Механический компрессор применяется при  $p_0 \leq p_1$  и отсутствии ресурса давления пара источника для работы струйного компрессора.

Из тепловых балансов процессов смешения в струйном компрессоре и разделения фаз потока в сепараторе (см. рис. 1, а) с учетом зависимостей свойств пара от давления [1] получим:

для коэффициента инжекции струйного компрессора

$$u = G_{\text{вт}} / G_0 = (748,53 p_1^{0,25} - 431) / (2680 - 748,53 p_1^{0,25}); \quad (1)$$

для давления инжектирующего пара

$$p_0 = [u(p_1^{0,25} - 0,576) + p_1^{0,25}]^4, \quad (2)$$

где  $p_1$  — давление пара в теплообменнике, МПа;  $G_{\text{вт}}$  и  $G_0$  — расходы инжектируемого (вторичного) и инжектирующего пара.

Зависимости (1) и (2) представлены в графическом виде на рис. 2. Там же приведена вспомогательная (диагональная) штриховая линия, расстояние по вертикали от которой до линии  $p_0 = f(p_1)$  соответствует необходимому для работы струйного компрессора превышению давления  $p_0$  над  $p_1$ . Для области  $p_1 < 1$  МПа это превышение невелико. Так, при  $p_1 = 0,8$  МПа оно составляет 0,19 МПа. На предприятиях такой ресурс избыточного давления обычно имеется, поскольку промышленные паровые котлы часто эксплуатируются с недогрузкой по давлению.

С целью определения экономической эффективности сжатия пара по схемам на рис. 1 воспользуемся выражением для расчета переменной части годовых приведенных затрат, руб/год,

$$П = (C_{\text{м}} M_{\text{м}} + C_{\text{н}} N_{\text{н}}) (p_{\text{н}} + p_{\text{а}}) + \tau C_{\text{эл}} N_{\text{н}}, \quad (3)$$

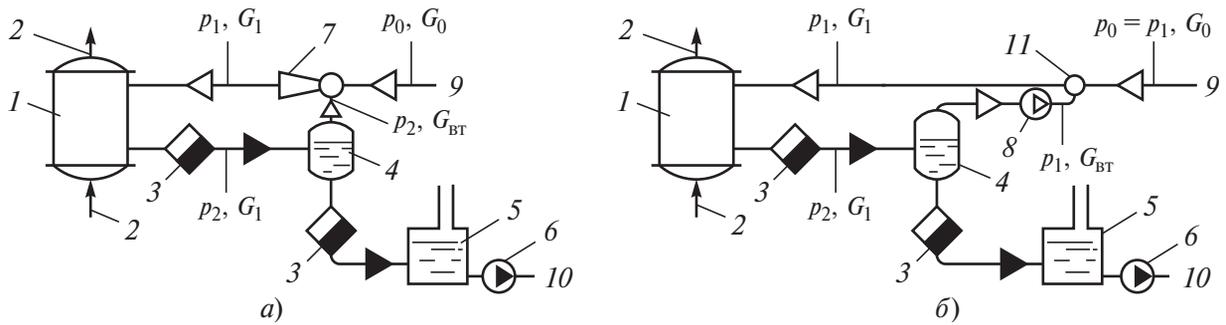


Рис. 1. Схема теплообменной установки со струйным (а) и механическим (б) компрессорами для сжатия вторичного пара: 1 — теплообменник; 2 — нагреваемый продукт; 3 — конденсатоотводчик; 4 — сепаратор; 5 — конденсатный бак; 6 — конденсатный насос; 7 — струйный компрессор (инжектор); 8 — механический (винтовой) компрессор; 9 — греющий пар от источника; 10 — конденсат к источнику; 11 — смеситель

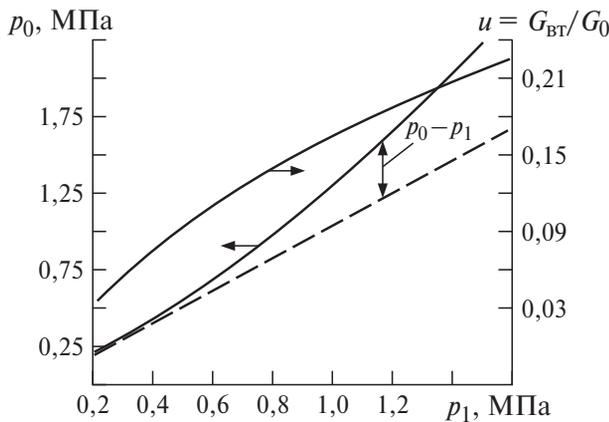


Рис. 2. Зависимости  $p_0$  и  $u$  от  $p_1$  при  $p_2 = 0,11$  МПа

где  $C_M$  — цена на материал и монтаж, руб/кг;  $M_M$  — масса материала, кг;  $C_H$  — стоимость единицы установленной мощности нагнетателя с учетом стоимости монтажа, руб/кВт;  $N_H$  — мощность нагнетателя, кВт;  $p_H$  — нормативный коэффициент эффективности капитальных затрат, год<sup>-1</sup>;  $p_a$  — коэффициент, учитывающий амортизационные отчисления, расходы на ремонт и содержание оборудования, год<sup>-1</sup>;  $\tau$  — число часов работы в год;  $C_{эл}$  — цена электроэнергии, руб/(кВт · ч).

Для определенности расходы потоков  $G_{BT}$  и  $G_0$  будем вычислять при расходе исходного пара в теплообменник  $G_1 = 1$  кг/с.

Струйный компрессор не потребляет электроэнергию, поэтому для схемы на рис. 1, а вместо выражения (3) запишем:

$$\Pi = C_M M_M (p_H + p_a). \quad (4)$$

Принимая  $C_M = 500$  руб/кг (нержавеющая сталь),  $M_M = 20$  кг,  $p_H = 0,12$  год<sup>-1</sup> и  $p_a = 0,13$  год<sup>-1</sup>, из выражения (4) получаем  $\Pi = 2500$  руб/год.

Для схемы с винтовым компрессором (см. рис. 1, б) вместо выражения (3) имеем

$$\Pi = C_H N_H (p_H + p_a) + \tau C_{эл} N_H, \quad (5)$$

где  $N_H = G_{BT} (p_0 + p_1)$ ;  $\tau = 8640$  ч/год.

Обработка ценовых данных для винтовых компрессоров, приведенных в [2], позволила получить корреляционную зависимость для определения стоимости, тыс. руб/кВт, единицы установленной мощности

$$C_K = 9,4 + 71 N_H^{-0,7} \quad (6)$$

в интервале изменения  $N_H = 3 \div 400$  кВт.

Приняв затраты на монтаж винтовых компрессоров в блочном исполнении равными 10 % их стоимости, получим:

$$C_K = 10,34 + 78,1 N_H^{-0,7}. \quad (7)$$

С учетом зависимости (7) при  $C_{эл} = 4$  руб/(кВт · ч) вместо выражения (5) имеем

$$\Pi = G_{BT} (p_0 - p_1) \{34562,6 + 19,5/[G_{BT} (p_0 - p_1)^{0,7}]\}. \quad (8)$$

Экономическую эффективность использования вторичного пара определим как разность годовой стоимости, руб/год, содержащейся в нем теплоты

$$\Pi_T = 8,6 \cdot 10^{-4} G_{BT} \tau r_1 C_T \quad (9)$$

и годовых приведенных затрат на сжатие

$$\Xi = \Pi_T - \Pi, \quad (10)$$

где  $r_1$  — теплота конденсации пара при давлении  $p_1$ .

Результаты расчетов по вышеприведенным зависимостям представлены на рис. 3. Как видно, в области  $p_1 < 0,4$  МПа обе рассматриваемые схемы сжатия вторичного пара в экономическом отношении практически рав-

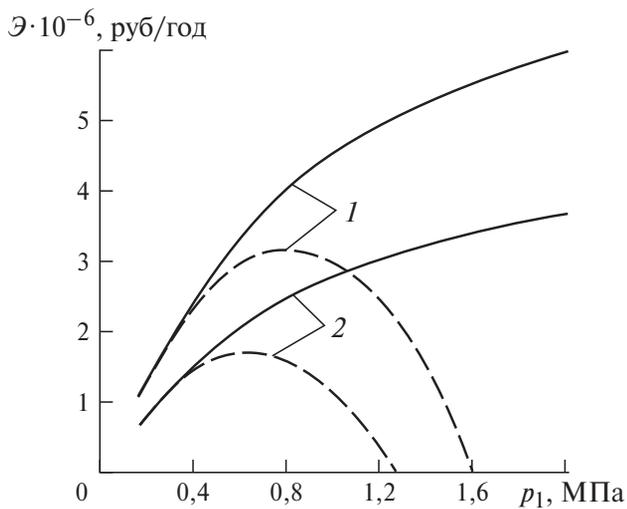


Рис. 3. Зависимость экономической эффективности  $\mathcal{E}$  сжатия вторичного пара от давления  $p_1$  греющего пара при его расходе  $G_1 = 1$  кг/с:

— — струйный компрессор; - - - - - винтовой компрессор;  $p_2 = 0,11$  МПа; 1 и 2 — при  $C_T = 2000$  и 1200 руб/Гкал

нозначны. При  $p_1 > 0,4$  МПа схема со струйным компрессором эффективнее, и ее абсолютная и относительная эффективности растут с увеличением  $p_1$ . Максимальная экономическая эффективность сжатия вторично-

го пара винтовым компрессором достигается в области  $p_1$  от 0,6 до 0,8 МПа. При  $p_1 > 0,8$  МПа его экономическая эффективность резко снижается из-за возрастающих эксплуатационных затрат. По этой причине при  $p_1 \geq 1,25$  МПа,  $C_T = 1200$  руб/Гкал и  $p_1 \geq 1,6$  МПа,  $C_T = 2000$  руб/Гкал применение винтового компрессора становится экономически невыгодным.

Таким образом, использование вторичного пара путем его сжатия экономически выгодно (особенно струйным компрессором) и сравнительно легко может быть реализовано технически. Экономический эффект, составляющий миллионы рублей в год для  $G_1 = 1$  кг/с (см. рис. 3), при других расходах греющего пара изменится примерно пропорционально.

#### Список литературы

1. Вознесенский А. А. Тепловые установки в производстве строительных материалов и изделий. — М.: Изд-во лит-ры по строительству, 1964.
2. <http://kompressory.vseinstrumenti.ru/vintovye/page2#goods>.

[m xp@techn.sstu.ru](mailto:mxp@techn.sstu.ru)