

СТРУЙНЫЕ ТЕПЛОВЫЕ НАСОСЫ В ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИХ ТЕХНОЛОГИЯХ



Е.Н. Пирогов



Е.В. Драбкина

Приведены классификация и теоретические положения функционирования струйных аппаратов, а также рассмотрено их применение для утилизации теплоты кубового остатка ректификационных колонн.

Ключевые слова: струйные аппараты, эжектор, пароконденсационный тепловой насос, коэффициент инжекции

EDN: EJNVKJ

Основным достоинством струйных аппаратов, включая струйные тепловые насосы, является простота конструкции и, как следствие, низкая стоимость. При этом в них отсутствуют движущиеся механические части, что делает их износостойкими и надежными в работе [1]. Классификация струйных аппаратов производится в зависимости от степени расширения и степени сжатия.

В газоструйных или пароструйных компрессорах отношение давлений рабочего и инжектируемого потоков много больше критического отношения давлений и составляет значение в пределах

$$2,5 \geq \frac{p_0}{p_n} \geq 1,2 .$$

Газоструйные или пароструйные эжекторы характеризуются степенью сжатия

$$\frac{p_0}{p_n} \geq 2,5 .$$

Газоструйные или пароструйные инжекторы характеризуются степенью сжатия

$$\frac{p_0}{p_n} \leq 1,2 .$$

Пирогов Евгений Николаевич, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Теплоэнергетика и водоснабжение на транспорте» Российского университета транспорта (РУТ (МИИТ)). Область научных интересов: энергосбережение, теплотехника. Автор более 130 научных работ.

Драбкина Елена Васильевна, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Теплоэнергетика и водоснабжение на транспорте» Российского университета транспорта (РУТ (МИИТ)). Область научных интересов: энергосбережение, теплотехника. Автор более 65 научных работ.

Коваленко Надежда Всеволодовна, кандидат экономических наук, доцент, доцент кафедры «Экономические теории» Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). Область научных интересов: экономические проблемы развития, экономическая политика, экономический рост, инновационное развитие экономики, государственное регулирование экономики. Автор более 50 научных работ.

Улюкина Елена Анатольевна, доктор технических наук, профессор кафедры «Материаловедение и технологии машиностроения» Российского государственного аграрного университета - МСХА имени К.А. Тимирязева (РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева). Область научных интересов: полимерные материалы, фильтрующие перегородки, топлива и смазочные материалы, процессы очистки нефтепродуктов. Автор более 140 научных работ.

Сложность задач, решаемых с помощью струйных аппаратов, характеризуется таким параметром как коэффициент инжекции u . Эта характеристика показывает степень вовлечения в теплоснабжение вторичных тепловых ресурсов, а именно паров вскипания G_n , которые при смешении с острым паром G_p образуют теплоноситель с теплофизическими свойствами, необходимыми для использования в ректификационных колоннах. Количество паров вскипания соответствуют степени разрежения в аппарате-испарителе.

$$u = \frac{G_n}{G_p} \quad (1)$$

Физическая модель рабочего процесса эжектора описана в работах [3–5].

Процессы, протекающие в аппаратах струйной техники, описываются следующими законами [1]:

- закон сохранения энергии

$$i_p + u \cdot i_n = (1 + u) \cdot i_c \quad (2)$$

где i_p, i_n, i_c – энтальпия, соответственно, рабочего, инжектируемого потока до аппарата и смешанного потока

после него, кДж/кг; $u = \frac{G_n}{G_p}$ – коэффициент инжекции,

т.е. отношение массового расхода инжектируемого потока к массовому потоку рабочего потока;

- закон сохранения массы

$$G_c = G_p + G_n \quad (3)$$

где G_p, G_n, G_c – массовые расходы рабочего, инжектируемого и смешанного потоков, кг/с;

- закон сохранения импульсов

$$G_p \cdot \omega_{p1} + G_n \cdot \omega_{n1} - (G_p + G_n \cdot \omega_3 = p_3 \cdot f_3 + \int p \cdot df_1 f_3 - (p_{p1} \cdot f_{p1} + p_{n1} \cdot f_{n1}), \quad (4)$$

где $\omega_{p1}, \omega_{n1}, \omega_3$ – скорости рабочего и инжектируемого потоков во входном сечении камеры смешения и смешанного потока в выходном сечении этой камеры, м/с; p_{p1}, p_{n1}, p_3 – статические давления рабочего и инжектируемого потоков во входном сечении камеры смешения и смешанного потока в выходном сечении этой камеры, Н/м²; f_{p1}, f_{n1}, f_3 – площади сечений рабочего и инжектируемого потоков во входном сечении камеры смешения и смешанного потока в выходном

сечении этой камеры, м²; $\int p \cdot df$ – интеграл импульса

сил на боковую поверхность камеры смешения.

На эффективность работы струйного аппарата влияют не только конструктивные размеры его узлов

(сопловой части, камеры смешения и диффузора), но и взаимное расположение их в изделии в целом.

Термокомпрессионные установки (струйные тепловые насосы) для утилизации теплоты жидкостных технологических потоков предназначены для снижения расхода тепловой энергии в виде пара. Наиболее эффективно эта задача решается в технологическом теплоснабжении и применительно к теплоэнергетическим производствам. В пищевом, химическом и биотехнологическом производствах этому критерию отвечают ректификационные колонны. Утилизация и вовлечение низкопотенциальной теплоты кубовых остатков ректификационных колонн является перспективным направлением в энергосбережении, так как результат достигается путем незначительных материальных затрат.

Рассмотренная термокомпрессионная установка для утилизации теплоты кубовых остатков является по сути тепловым насосом струйного типа и позволяет реализовать процесс ректификации целевого продукта при меньшем расходе острого пара за счет охлаждения кубового остатка и последующего сжатия образовавшихся паров вскипания до предусмотренных технологическим регламентом параметров.

Схема включения струйного теплового насоса в ректификационном отделении представлена на рис. 1.

Основными элементами схемы являются паровой эжектор 3, испаритель кубового остатка 2, в качестве которого используется приемная емкость кубового остатка усиленной конструкции, связанной с работой ее под вакуумом, регулятор расхода 5, запорно-регулирующая арматура и контрольно-измерительные приборы.

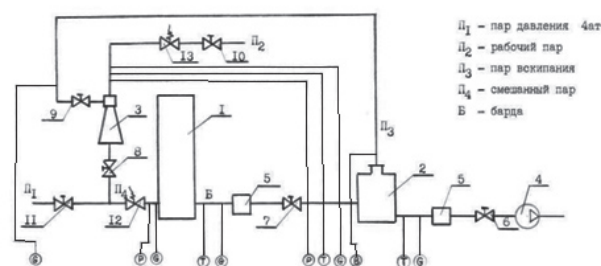


Рис. 1. Схема термокомпрессионной установки для утилизации теплоты кубового остатка:

- 1 – ректификационная колонна; 2 – испаритель;
- 3 – паровой эжектор; 4 – насос для откачки кубового остатка; 5 – регулятор расхода;
- 6, 7, 8, 9, 10, 11 – запорная арматура;
- 12, 13 – регулирующая арматура

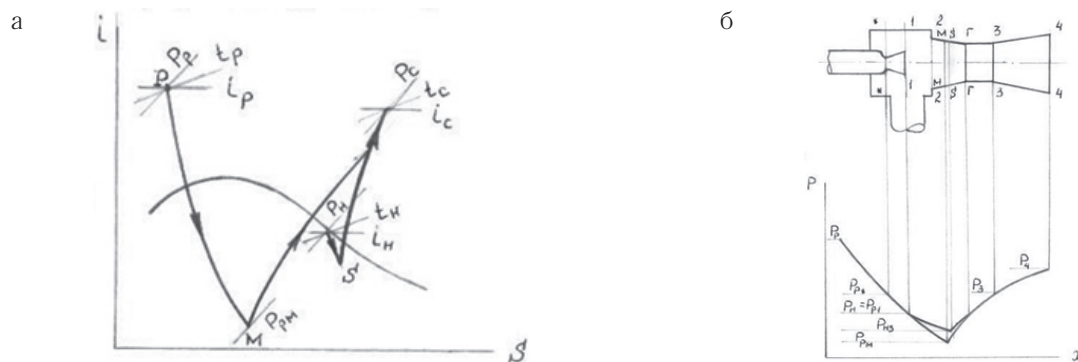


Рис. 4. Процесс в струйном аппарате (а)
и схема пароструйного эжектора и изменение давления по его длине (б)

до температуры 80–85°C. Пары вскипания засасываются по трубопроводу Π_3 в смесительную камеру парового эжектора, в рабочее сопло которого по трубопроводу Π_2 поступает перегретый пар. Смешанный пар необходимых параметров по трубопроводу Π_4 направляется в барботер для обогрева ректификационной колонны 1. Охлажденный в испарителе кубовый остаток через регулятор уровня направляется на дальнейшее использование согласно технологическому регламенту.

При проектировании термокомпрессионной установки и ее эксплуатации производится контроль следующих технологических параметров: расход кубового остатка, м³/ч, температура кубового остатка на выходе из ректификационной колонны, расход перегретого пара на входе в сопло парового эжектора, температура перегретого пара, расход смешанного пара, температура в испарителе, температура кубового остатка на выходе из испарителя.

Некоторые параметры фиксируются установленными приборами КИПиА и используются для уточнения исходных данных для расчета геометрических размеров парового эжектора.

Расход рабочего пара определяется по формуле:

$$G_p = 2,28 \cdot f_{p*} \cdot \sqrt{\frac{p_p}{v_p}}, \quad (5)$$

где f_{p*} — площадь критического сечения сопла; p_p — давление рабочего пара; v_p — удельный объем рабочего пара.

Измеренные параметры позволяют рассчитать характеристики парового эжектора, а также, используя балансовые и термодинамические соотношения, оценить термоэкономическую эффективность применения термокомпрессионной установки в целом и определить необходимые для расчета параметры технологического процесса.

В испарителе за счет создания паровым эжектором вакуума происходит вскипание паров, а, следовательно и снижение температуры кубового остатка. Эти показатели определяют тепловую нагрузку на испаритель:

$$Q_n = G_{\text{к.ост.}} \cdot C_{\text{к.ост.}} \cdot (t'_{\text{к.ост.}} - t''_{\text{к.ост.}}), \quad (6)$$

или $Q_n = G_n \cdot r$.

Количество паров вскипания в испарителе, поступающее в паровой эжектор

$$G_n = \frac{Q_n}{r} = \frac{G_{\text{к.ост.}} \cdot C_{\text{к.ост.}} \cdot (t'_{\text{к.ост.}} - t''_{\text{к.ост.}})}{r}. \quad (7)$$

Коэффициент эжекции парового эжектора:

$$U = \frac{G_n}{G_p}, \quad (8)$$

или $G_n = U G_p$.

Количество смешанного пара, поступающего в ректификационную колонну на обогрев определяется по формуле:

$$G_c = G_p + G_n = G_p + U G_p = G_p (1 + U). \quad (9)$$

Построение характеристики работы парового инжектора, а именно зависимость коэффициента инжекции, расхода и давления от параметров технологического процесса, где он применяется, позволяет установить диапазон его применимости и его поведение в нерасчетном режиме. Такие внешние параметры как противодавление, обусловленное внешними факторами, критически воздействуют на стабильность работы инжектора и всей технологии в целом.

Чем сильнее необходимо охладить кубовый остаток, тем большее количество вторичного пара образуется в испарителе и тем больше коэффициент инжекции.

Величина коэффициента инжекции определяется по формуле:

$$U = \frac{G_{\text{к.ост.}} \cdot C_{\text{к.ост.}} \cdot (t'_{\text{к.ост.}} - t''_{\text{к.ост.}})}{(i_1 - i_2) \cdot \left[G_c - \frac{G_{\text{к.ост.}} \cdot C_{\text{к.ост.}} \cdot (t'_{\text{к.ост.}} - t''_{\text{к.ост.}})}{i_1 - i_2} \right]}, \quad (10)$$

где $G_{\text{к.ост.}}$ — количество кубового остатка; $C_{\text{к.ост.}}$ — теплоемкость кубового остатка; $t'_{\text{к.ост.}}$, $t''_{\text{к.ост.}}$ — начальная и конечная температуры кубового остатка; i — энтальпия насыщенного пара при давлении в испарителе.

Расчет парового инжектора заключается в определении его поперечных сечений: $d_{\text{рк}}$, d_2 , d_3 . Размеры $d_{\text{р}}$, $d_{\text{н}}$, $d_{\text{с}}$ — это диаметры паропроводов и определяются согласно известным правилам.

Для расчета парового инжектора необходимы следующие исходные данные: расход смешанного пара, подаваемого в ректификационную колонну, параметры рабочего пара (давление, температура, энтальпия), расход и температура кубового остатка на выходе из ректификационной колонны.

Энтальпия смешанного пара определяется по формуле:

$$i_{\text{с}} = \frac{i_{\text{р}} + U i_{\text{н}}}{1 + U}. \quad (11)$$

Удельные объемы соответственно рабочего, вторичного и смешанного пара $v_{\text{р}}$, $v_{\text{н}}$, $v_{\text{с}}$ определяются по таблицам или схеме $i-S$.

Площадь критического сечения рабочего сопла рассчитывается по формуле для перегретого пара

$$F_{\text{р}} = 47 \cdot 85 G_{\text{р}} \cdot \sqrt{\frac{v_{\text{р}}}{P_{\text{р}}}}. \quad (12)$$

Диаметр критического сечения рабочего сопла

$$d_{\text{р}} = 1,13 \cdot \sqrt{F_{\text{р}}}. \quad (13)$$

Площадь выходного сечения рабочего сопла рассчитывается по формуле для перегретого пара

$$F_2 = \frac{0,0226 \cdot F_{\text{р}}}{\left(\frac{p_{\text{н}}}{p_{\text{р}}}\right)^{0,77} \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{p_{\text{н}}}{p_{\text{р}}}\right)^{0,23}}}. \quad (14)$$

Диаметр выходного сечения рабочего сопла рассчитывается по формуле:

$$d_2 = 1,13 \cdot \sqrt{F_2}. \quad (15)$$

Длина расширяющейся части сопла определяется углом конусности, который принимается равным 8° .

Сечение цилиндрической камеры смешения F_3 наряду с критическим сечением рабочего сопла

$F_{\text{р}}$ является основной величиной, определяющей коэффициент инжекции и КПД парового инжектора.

Коэффициент инжекции зависит от отношения $\frac{F_3}{F_{\text{р}}}$.

При его уменьшении падает U , но растет отношение

давлений $\frac{p_{\text{с}}}{p_{\text{н}}}$ и, наоборот, с увеличением $\frac{F_3}{F_{\text{р}}}$ увеличивается U и снижается степень сжатия.

Отношения сечений $\frac{F_3}{F_{\text{р}}}$ и $\frac{F_2}{F_{\text{р}}}$ являются геометрическими параметрами подобия пароинжекторных установок.

Пароинжекторные установки, имеющие различные геометрические размеры, но одинаковые соотношения сечений, имеют одинаковые характеристики.

Диаметр цилиндрической камеры смешения определяется по формуле:

$$d_3 = 115,2 \cdot \sqrt{G_{\text{с}} \cdot v_{\text{н}}} \cdot \sqrt[4]{\frac{\eta + U}{\eta \cdot i_0}}. \quad (16)$$

Длина камеры смешения принимается в зависимости от величины коэффициента инжекции $L_{\text{к}} = (6-10)d_2$.

Длина диффузора определяется, исходя из угла раствора его $8-10^\circ$ по формуле:

$$L_{\text{д}} = (6-7)(d_{\text{с}} - d_3). \quad (17)$$

Важное значение для работы парового инжектора имеет правильная установка рабочего сопла относительно камеры смешения, как в части совпадения осей, так и в выборе расстояния его от камеры смешения.

Выбор этого расстояния определяется из условия, что свободная струя, выходящая из рабочего сопла при заданном коэффициенте инжекции, точно вписывается во входное сечение камеры смешения. При выборе этого расстояния учитывается величина коэффициента инжекции. Необходимо определить два размера:

• длину свободной струи:

$$\text{при } U < 0,5 \quad S = (\sqrt{0,083 + 0,76 \cdot U} - 0,29) \cdot \frac{d_2}{2a}, \quad (18)$$

$$\text{при } U > 0,5 \quad S = \frac{0,37 + U}{4,4 \cdot a} \cdot d_2,$$

где $a = (0,07 \div 0,09)$ — опытная константа. При $< 0,2$ принимается нижний предел.

• диаметр свободной струи d_5 на расстоянии S :

$$\text{при } U < 0,5 \quad d_5 = 3,4 \cdot d_2 \cdot \sqrt{0,083 + 0,76U}, \quad (19)$$

$$\text{при } U > 0,5 \quad d_5 = 1,55 d_2 (1 + U).$$

Если диаметр камеры смешения $d_3 > d_5$, то расстояние L_s принимается равным S , причем более близкая установка сопла не снижает эффективности аппарата.

При $d_3 < d_5$ расстояние $L_s = S + L^1$, где L^1 — длина входного участка камеры смешения, на котором диаметр меняется от значения d_5 до значения d_3 .

Рассматриваемая конструкция парового инжектора приведена на рис. 5.

Приведенный пример практического использования струйного теплового насоса (термокомпрессора) для решения задачи энергосбережения применительно к ректификационному разделению сред показал высокую эффективность, которая достигается за счет вовлечения в технологический процесс паров вторичного вскипания. Смешивание потоков острого пара и пара вторичного вскипания позволяет получить рабочий пар заданных параметров, необходимых для реализации процесса ректификации.

При этом исключаются выбросы пара в атмосферу за счет создания закрытой пароконденсатной системы.

Кроме того, образование паров вторичного вскипания приводит к охлаждению кубового остатка и, следовательно, снижает затраты на его охлаждение в процессе дальнейшей его переработки.

Заключение

В статье рассмотрена актуальность применения струйных аппаратов для решения задач энергосбережения. Представлены основные теоретические положения функционирования струйных аппаратов. Приведена классификация струйных аппаратов по различным критериям. Обозначены основные области применения струйных аппаратов. Приведен пример эффективного использования струйного теплового насоса в технологическом процессе ректификации. 

Литература

1. Соколов, Е. Я. Струйные аппараты / Е. Я. Соколов, Н. М. Зингер. - 3-е изд., перераб. - Москва : Энергоатомиздат, 1989. - 351 с. - Текст : непосредственный.
2. РД 34.30.302-87. Методические указания по наладке и эксплуатации пароструйных эжекторов конденсационных установок турбин ТЭС и АС. - ВТИ им. Ф. Э. Дзержинского, 1990. - Текст : непосредственный.
3. Кузнецов, В. И. Физико-математическая модель рабочего процесса струйного эжектора / В. И. Кузнецов, В. В. Макаров, А. Ю. Шандер. - Текст: непосредственный // Омский научный вестник. Серия Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. - 2021. - Т. 5, № 3. - С. 75-82.
4. Краснов, Н. Ф. Аэродинамика отрывных течений : учебное пособие для вузов / Н. Ф. Краснов, В. Н. Кошевой, В. Т. Калугин ; под ред. Н. Ф. Краснова. — Москва : Высшая школа, 1988. - 352 с. - Текст : непосредственный.
5. Сазонов, Ю. А. Расчет и конструирование струйных аппаратов : учебное пособие для студентов вузов, обучающихся по специальности «Машины и оборудование нефтяных и газовых промыслов», бакалавров и магистров, обучающихся по направлению 15.04.02 «Технологические машины и оборудование». - Москва: РГУ нефти и газа имени И. М. Губкина, 2016. - 64 с. - Текст : непосредственный.

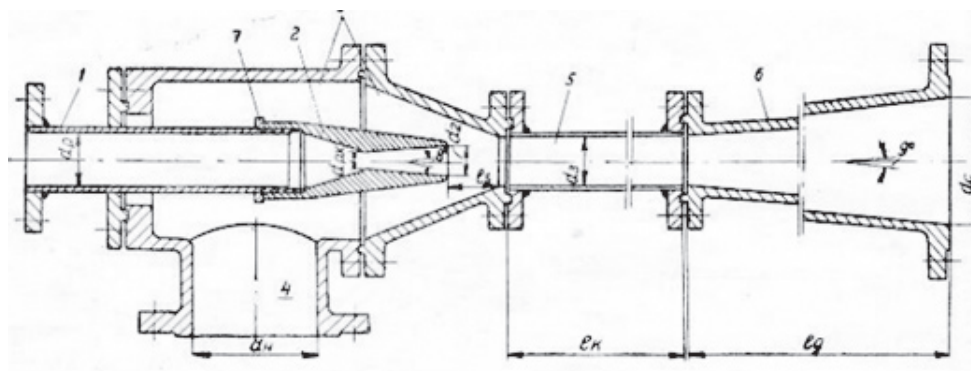


Рис. 5. Пароструйный инжектор системы ВТИ: 1- патрубок рабочего пара; 2 – рабочее сопло; 3 – приемная камера; 4 – штуцер для паров вскипания; 5 – камера смешения; 6 – диффузор; 7 – вспомогательное устройство