

**Кляхин Г.А.**  
(ОАО «Гродно Азот»)  
**Францкевич В.С.**

(Белорусский государственный технологический университет)

## **ВЛИЯНИЕ КАВИТАЦИОННО-ЭРОЗИОННОГО ИЗНОСА ТРУБОПРОВОДОВ ВОДЯНОГО ПАРА НА РАБОТОСПОСОБНОСТЬ ПАРОЭЖЕКТОРНОЙ УСТАНОВКИ В ПРОИЗВОДСТВЕ КАПРОЛАКТАМА**

**Введение.** Пароструйные эжекторные вакуум-насосы широко используются в химической промышленности за счет простоты технического устройства и наличия эжектирующей среды (водяной пар), образующейся в технологическом процессе, например, получения капролактама.

**Основная часть.** Кавитацией называется явление парообразования и выделения воздуха, обусловленной понижением давления в жидкости. Причиной ее возникновения служит кипение жидкости при нормальной температуре и низком давлении. Появлению кавитации способствует растворенный в воде воздух, который выделяется при уменьшении давления [1]. Основной проблемой в кавитации является эрозия. Высокие быстро меняющиеся давления и тепловые ударные волны вызывают в материале вблизи сжимающегося пузырька разрушения, причиной которых, являются усталостные процессы.

При кавитации на поверхности детали в области пониженного давления образуются кавитационные полости (пузырьки или каверны) из ядер кавитации, которые присутствуют в любой жидкости. Эти полости расположены как непосредственно на поверхности детали, так и на расстоянии от нее. При попадании полостей в область повышенного давления происходит их сжатие с образованием микроструй, механически воздействуя на поверхность детали в случае схлопывании пузырька у поверхности. При периодическом воздействии этих микроструй происходит унос массы материала с образованием лунок на поверхности детали [2].

Как было отмечено в работе [1] углеродистая сталь наиболее подвержена кавитационной эрозии и имеет скорость эрозии 5,5 мм<sup>3</sup>/ч. А нержавеющая сталь, напротив, имеет высокую стойкость к кавитационной эрозии и имеет скорость эрозии, всего лишь, 1,1 мм<sup>3</sup>/ч.

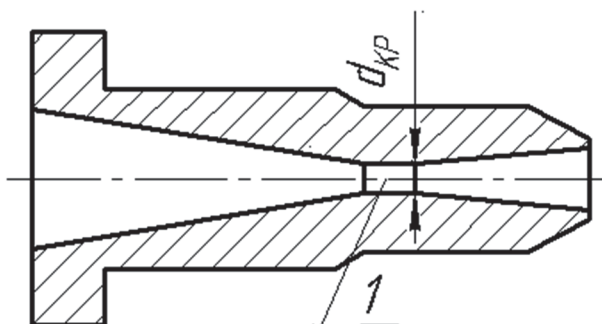
Как известно, в пароэжекторных установках, в роли эжектирующей среды выступает водяной пар [3, 4]. Транспортировка и подвод к соплам пароструйного эжекторного вакуум-насоса рабочей среды осуществляется по трубопроводам пара. Продуктом кавитационно-эрозионного износа внутренней поверхности трубопровода водяного

пара являются мелкие металлические частицы размером менее 0,1 мм, появившиеся в результате образования каверн и лунок на внутренней поверхности трубопровода [2].

Такие источники как [3, 4] предлагают использовать нержавеющую сталь при изготовлении пароструйных эжекторных вакуум-насосов, что вполне себя оправдывает по технико-экономическим причинам. А вот заменить материал трубопроводов пара с углеродистой стали на нержавеющую сталь является экономически не целесообразно. Поэтому и необходимо смириться с тем, что вместе с потоком пара будут увлекаться и продукты кавитационно-эрозионного износа.

В процессе работы парэжекторной установки сперва происходит налипание металлических частичек на внутреннюю поверхность горла сопла, а затем закупоривание критического сечения сопла, что приводит к нестабильной работе вакуум-насоса и потере вакуума в ректификационной колонне. Для предотвращения закупоривания критического сечения сопла продуктами кавитационно-эрозионного износа внутренней поверхности подводящих трубопроводов водяного пара, производится периодическая остановка парэжекторной установки для чистки сопла. Данное мероприятие является рискованным в плане качества ведения технологического процесса получения циклогексанона.

На основании эксплуатационного опыта известно, что сопла, имеющие  $d_{кр} \leq 2,8$  мм, подвержены закупориванию металлическими частичками, налипшими на внутреннюю поверхность горла сопла, чего нельзя сказать о соплах с  $d_{кр} \geq 3,0$  мм, которые не имеют такую тенденцию.



**Рисунок 1 – Схема сопла пароструйного эжекторного вакуум-насоса**  
1 – горло сопла;  $d_{кр}$  – диаметр критический (внутренний диаметр горла), мм.

Для предотвращения выхода из строя пароструйного эжекторного вакуум-насоса требуется уловить металлические частички в подводящем трубопроводе пара до сопла.

Существующая схема парэжекторной установки, на подводящем трубопроводе пара, имеет два фильтра с фильтрующим элементом в виде сетки ячейкой 2,0 мм из нержавеющей стали, предназначенным

для улавливания крупных частичек, например окалины. Фильтр представляет собой цилиндрическую емкость наружным диаметром 76 мм и высотой 90 мм с двумя фланцевыми крышками, предназначенными для удобства чистки и снятия-установки сетки.

Нами было предложено рассмотреть вариант установки в имеющиеся основной и байпасный фильтры стержней из неодимового магнита типа NdFeB класса EH38 для улавливания мелких металлических частичек.

**Таблица – Основные характеристика неодимового магнита NdFeB-EH38 [5]**

Класс	Остаточная магнитная индукция, мТ	Коэрцитивная сила, кА/м	Магнитная энергия, кДж/м <sup>3</sup>	Рабочая температура, °С
EH38	1250	2388	310	200

Неодимовый магнит представляет собой стержень наружным диаметром 26 мм, длиной 100 мм и отверстием М6х12 по оси вращения. Одна часть магнита крепится посредством накручивания на шпильку М6х10, установленную в теле верхней фланцевой крышки фильтра, а вторая часть магнита устанавливается в паз нижней фланцевой крышки фильтра.

Ранее, при использовании фильтра без магнита приходилось производить чистку закупоренного сопла парожеткторного насоса каждые 400-480 часов непрерывной работы ректификационной колонны получения циклогексанона. В случае фильтра с установленным магнитом, по истечении 520 часов непрерывной работы оборудования, отказа вакуум-насоса не произошло.

**Заключение.** Кавитационно-эрозионный износ оборудования является актуальной проблемой в технологическом производстве. Особенно это коснулось оборудования малой производительности, проточная часть которого выходит из строя, закупориваясь продуктами кавитационно-эрозионного износа.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Пирсол И.С. Кавитация. Москва, 1975. 96 с.
2. Тимербулатов М.Г. Влияние коррозии и интенсивность кавитации на характеристики металлов в лабораторных и эксплуатационных условиях. Москва, 1974. 232 с.
3. Соколов Е.Я., Зингер Н.М. Струйные аппараты. Москва, 1989. 352 с.
4. Успенский В.А., Кузнецов Ю.М. Струйные вакуумные насосы. Москва, 1973. 144 с.
5. Спеддинг Ф.Х., Даан А.Х. Редкоземельные металлы. Москва, 1965. 610 с.
6. Цегельский В.Г. Струйные аппараты. Москва, 2017. 573 с.