

ТЕПЛОИСПОЛЬЗУЮЩИЙ КОНТУР ДЛЯ ВЫПАРНЫХ УСТАНОВОК

*А.А. Сирота, канд. техн. наук, Н.И. Радченко, д-р техн. наук, Д.В. Коновалов, аспирант,
Николаевский государственный гуманитарный университет им. Петра Могилы, г. Николаев, Украина*

1. Анализ проблемы и постановка задачи исследования

Выпарные установки (аппараты) широко применяются в пищевой (молочной, мясной, сахарной), химической и нефтехимической, а также в других отраслях промышленности. На судах рыбопромыслового флота они являются наиболее крупными потребителями пара и входят в состав рыбомучных установок (РМУ) [1, 2]. Применение РМУ позволяет перерабатывать отходы от разделки рыбы, а также малоценный в пищевом отношении прилов в кормовую муку. В настоящее время 80 % всей кормовой муки производится на судах рыбной промышленности.

Наиболее распространенный тип выпарных аппаратов, используемых в РМУ, – прямоточный (теплоноситель и сырье движутся в одном направлении). Выпарные аппараты на рыбопромысловых судах, как правило, выполняются многокорпусными (с двумя или тремя ступенями). Вторичный пар, образующийся при выпаривании сырья в первой ступени аппарата, используется в качестве греющего пара для второй ступени, в которой выпаривание ведется при более низких давлении и температуре [3, 4]. Давление и температура кипения в каждой последующей ступени аппарата всегда меньше, чем в предыдущей.

Одной из основных проблем теплоснабжения РМУ является наличие большого количества пара вторичного вскипания (вторичного пара), образующегося во второй (или третьей) ступени выпарного аппарата РМУ. Этот вторичный пар имеет давление ниже атмосферного (около 0,04 МПа) и конденсируется в процессе смешивания с морской водой в конденсаторе, из которого смешанный поток

отводится насосом за борт с соответствующими потерями теплоты.

В то же время на судах рыбопромыслового флота постоянно (особенно на промысле) ощущается дефицит пара и холода.

Одним из путей повышения эффективности работы выпарных аппаратов на рыбопромысловых судах является использование вторичного пара после второй ступени выпарного аппарата в теплоиспользующей эжекторной установке. Известно использование пароструйного эжектора для повышения экономичности многокорпусных выпарных аппаратов при упаривании томатного сока. При этом сжатию подвергают вторичный пар первого корпуса.

Целью настоящего исследования является анализ целесообразности использования низкопотенциального тепла пара вторичного вскипания в теплоиспользующих установках для производства пара и холода. Решение этой задачи обеспечило бы значительную экономию топлива и электроэнергии, способствовало бы защите окружающей среды от теплового загрязнения.

2. Анализ эффективности использования теплоты пара вторичного вскипания для производства холода

Для выявления резервов повышения эффективности потребления пара выпарным аппаратом и оценки целесообразности их реализации с помощью эжекторной холодильной машины (ЭХМ) проанализируем его работу на примере рыбомучной установки А1-ИЖР (изготовитель – ОАО "Нежинский механический завод"). Выпарной аппарат предназначен для выпаривания воды из осветленного бульона в целях повышения содержания в нем сухих веществ до 45...50 %. Полученный концентрат может

быть использован как самостоятельный продукт или же направлен в сырье (жом) для увеличения выхода муки и содержания в ней протеина.

Выпарная установка – прямоточная (по ходу продукта), непрерывного действия, с паровым нагревателем–калоризатором, представляющим собой вертикальный трубчатый пучок. В процессе выпаривания происходит многократная естественная циркуляция продукта в трубах. Раствор подают в первую ступень, обогреваемую острым паром, а упаренный раствор отводят из последней ступени установки (рис. 1).

Основным преимуществом этой схемы является то, что температура кипения раствора понижается от ступени к ступени вместе с увеличением концентрации. Это благоприятно сказывается на качестве продукта. Раствор поступает в последующую ступень перегретым, а значит, имеет место явление самоиспарения. К недостаткам этой схемы можно отнести повышение вязкости раствора с увеличением концентрации и с уменьшением температуры, что приводит к снижению коэффициента теплопередачи.

Установка двухступенчатая: первая ступень работает под давлением, вторая – под вакуумом. Каждая ступень установки состоит из калоризаторов 1 и 3, испарителей 2 и 4 и соединяющих их циркуляционных труб (рис. 1).

Обезжиренный бульон, предварительно нагретый до температуры 85...90 °С, подается центробежным насосом в подтрубное пространство калоризатора первой ступени. В межтрубное пространство подводится пар давлением до 0,5 МПа. Для предотвращения прямого удара струи пара о трубки с циркулирующим в них бульоном установлен отбойный щит. Трубный пучок калоризатора вварен в верхнюю и нижнюю трубные решетки. Межтрубное пространство снабжено патрубками для входа пара и выхода конденсата, краном для выпуска воздуха. В нижней части калоризатора имеются патрубки для подвода обезжиренного бульона и для спуска его в канализационную систему.

Кипящая парожидкостная смесь попадает в испаритель, где происходят интенсивное испарение влаги и разделение пара и капельной влаги. Конец патрубка, соединяющего испаритель с надтрубной камерой нагревателя–калоризатора, направлен по касательной к цилиндрической стенке испарителя. Это создает центробежный эффект, который улучшает условия разделения пара и капель влаги, отбрасываемых к стенкам испарителя. Оставшаяся часть бульона из испарителя по циркуляционной трубе возвращается в подтрубное пространство калоризатора. На трубе смонтирован датчик контроля температуры концентрируемого бульона. На испарителе второй ступени установлен предохранительный клапан, отрегулированный на предельное давление 0,15 МПа.

Вторичный пар, образующийся в испарителе первой ступени, направляется в межтрубное пространство калоризатора второй ступени. Выпаренный до 15 % концентрации бульон поступает из калоризатора первой ступени в надтрубное пространство калоризатора второй ступени.

Во второй ступени происходит процесс, аналогичный процессу в первой ступени, но уже при нагревании вторичным паром давлением 0,15 МПа. Конструкции первой и второй ступеней выпарного аппарата одинаковы. Поскольку испарение происходит при нагревании паром низкого давления, во второй ступени поддерживается вакуум.

Испаритель второй ступени связан трубопроводом с противоточным конденсатором смешения (контактного типа), служащим для конденсации вторичного пара второй ступени. Внутри корпуса конденсатора расположен цилиндр для равномерного распределения пара, поступающего на конденсацию. Охлаждающая морская вода подается насосом и разбрызгивается через перфорированный стакан, закрепленный на верхней крышке конденсатора. В верхней части корпуса расположен также патрубок для отсоса неконденсирующихся газов воздуха. Смесь охлаждающей воды и конденсата вторичного пара

откачивается в канализацию конденсатным электронасосом.

Вакуум во второй ступени выпарного аппарата (0,04 МПа) поддерживается конденсацией паров и водокольцевым вакуум-насосом.

Концентрированный бульон, содержащий 45... 50 % плотных веществ, по трубопроводу отводится из подтрубного пространства калоризатора второй ступени и винтовым насосом перекачивается для смешивания с жомом.

В процессе выпаривания уровень бульона регулируется в обеих ступенях испарения автоматически с помощью поплавковых датчиков уровня. Контроль давления и разрежения осуществляется манометрами и вакуумметрами, температурного режима – термометрами сопротивления.

Основные технические характеристики выпарного аппарата РМУ А1-ИЖР следующие:

- производительность по выпаренной влаге – 1200 кг/ч;
- расход острого пара – не менее 1100 кг/ч;
- давление пара в калоризаторе I ступени – 0,5 МПа (температура 158 °С);
- давление пара в калоризаторе II ступени – не более 0,15 МПа;
- вакуум в испарителе II ступени – 0,04 МПа.

Отвод вторичного пара после второй ступени в конденсатор вместо использования его для обогрева следует расценивать как прямые тепловые потери установки. С целью использования вторичного пара в качестве теплоносителя для теплообменных аппаратов технологического оборудования судна возможно применение эжекторной теплоиспользующей установки 5 (рис. 1).

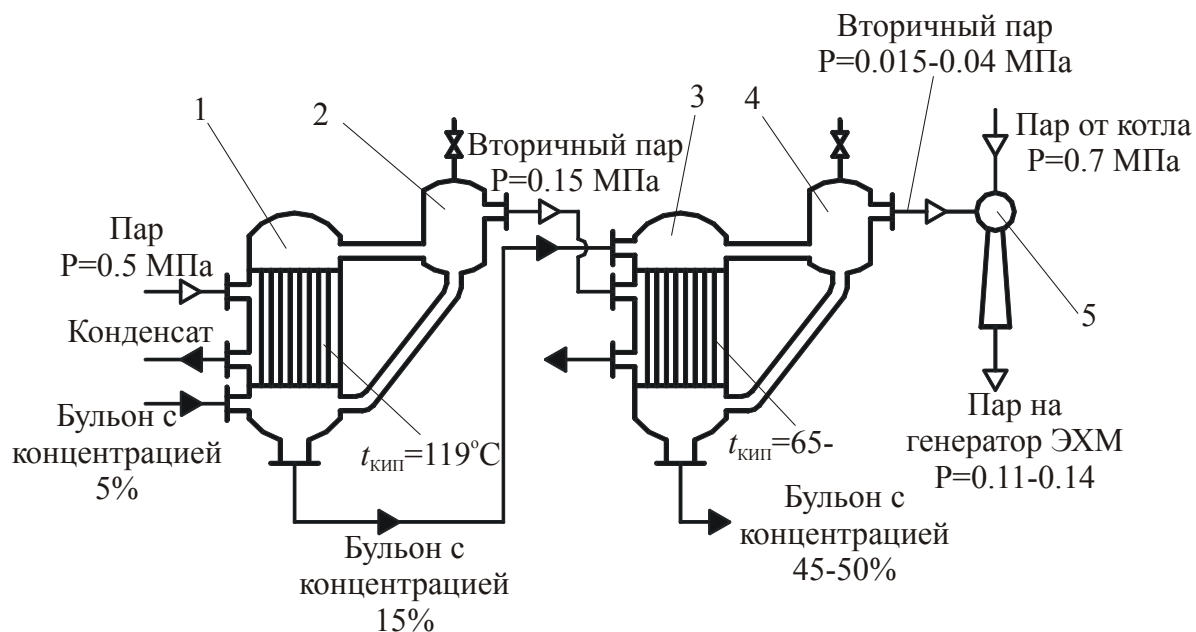


Рис. 1. Двухступенчатый прямоточный выпарной аппарат

с поджатием вторичного пара эжектором:

- | | |
|-----------------------------|----------------------------|
| 1 – калоризатор I ступени; | 2 – испаритель I ступени; |
| 3 – калоризатор II ступени; | 4 – испаритель II ступени; |
| 5 – эжектор паровой | |

Количество вторичного пара, образующегося после второй ступени выпарного аппарата, составляет 205 кг/ч (давление 0,04 МПа и температура 75 °С). Используя эжекторную установку, можно повысить давление пара до величины выше атмосферного.

Исходя из значений давления греющего пара от котла (0,7 МПа), вторичного пара после второй ступени выпарного аппарата (0,04 МПа) и их смеси

(0,11 МПа), для РМУ А1-ИЖР был получен коэффициент эжекции (отношение расходов эжектируемого вторичного пара и острого пара высокого давления), равный 0,32. Расчет коэффициента эжекции был произведен по методике [2]. Полученная величина коэффициента эжекции позволяет применить эжектор для производства как тепла, так и холода.

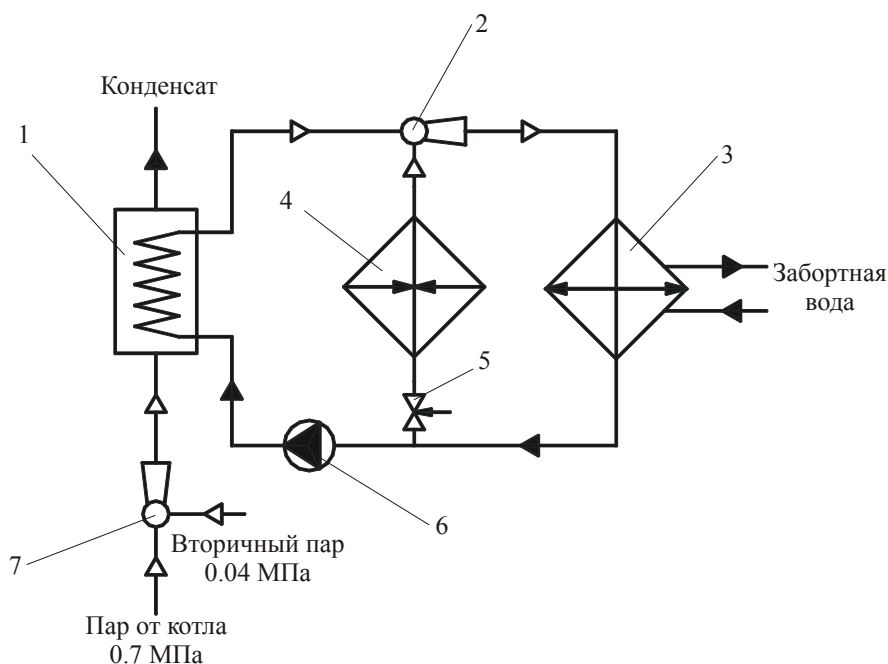


Рис. 2. Схема теплоиспользующей эжекторной холодильной машины:

- | | |
|----------------------------|-----------------------------------|
| 1 – генератор пара фреона; | 2 – эжектор фреоновый; |
| 3 – конденсатор; | 4 – испаритель-воздухоохладитель; |
| 5 – дроссельный клапан; | 6 – циркуляционный насос; |
| 7 – эжектор паровой | |

Эжектор, в рабочее сопло которого подается пар высокого давления (0,7 МПа) в количестве 640 кг/ч, эжектирует вторичный пар с давлением 0,04 МПа и расходом 205 кг/ч. При этом их смесь имеет давление 0,11 МПа и расход 845 кг/ч. Пар с такими параметрами можно использовать в качестве теплоносителя на технологические нужды: для мойки тарелок сепаратора в той же РМУ, подогрева жировых танков, пресной и забортной воды и т.п. Его

можно также применять в эжекторной холодильной машине (рис. 2).

Так как температурный уровень вырабатываемого холода зависит от термодинамической ценности потребляемого тепла, ЭХМ, использующие низкопотенциальное тепло, целесообразно применять для получения холода при сравнительно высоких температурах, например, в технике комфортного и технологического кондиционирования воздуха при температурах кипения в испарителе $t_0 = 5 \dots 10 \text{ } ^\circ\text{C}$.

Как показали исследования, проведенные в ОГАХ [5, 6], наиболее подходящим хладагентом для эжекторной холодильной машины является R 142b [7].

Для данной схемы были рассчитаны коэффициенты эжекции U , представляющие собой отношение расходов эжектируемого пара, поступающего из испарителя-воздухоохладителя, и пара высокого давления от генератора (рис. 3), и удельные мощности циркуляционного насоса $N_{н,уд}$ (рис. 4).

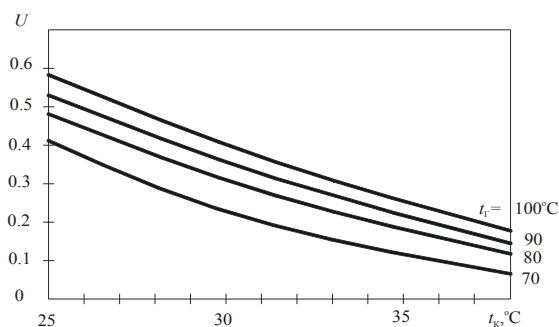


Рис. 3. Зависимость коэффициента эжекции U фреонового эжектора от температуры конденсации t_k при разных температурах генерации t_r и температуре кипения в испарителе-воздухоохладителе $t_0 = 5\text{ °C}$

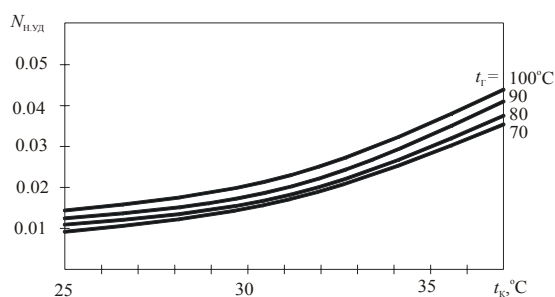


Рис. 4. Зависимость удельной мощности циркуляционного насоса $N_{н,уд}$ от температуры конденсации t_k при разных температурах генерации t_r и $t_0 = 5\text{ °C}$

Величина $N_{н,уд}$ определялась как отношение мощности насоса к холодопроизводительности Q_0 и представляла собой удельные затраты электроэнергии на привод насоса, отнесенные к 1 кВт вырабатываемого в ЭХМ холода.

На рис. 5, а и б представлены холодильный коэффициент ϵ и эффективный холодильный

коэффициент $\epsilon_{эф}$ (без учета теплоты вторичного пара) для диапазона температур конденсации $t_k = 25...40\text{ °C}$ и температур генерации $t_r = 70...100\text{ °C}$.

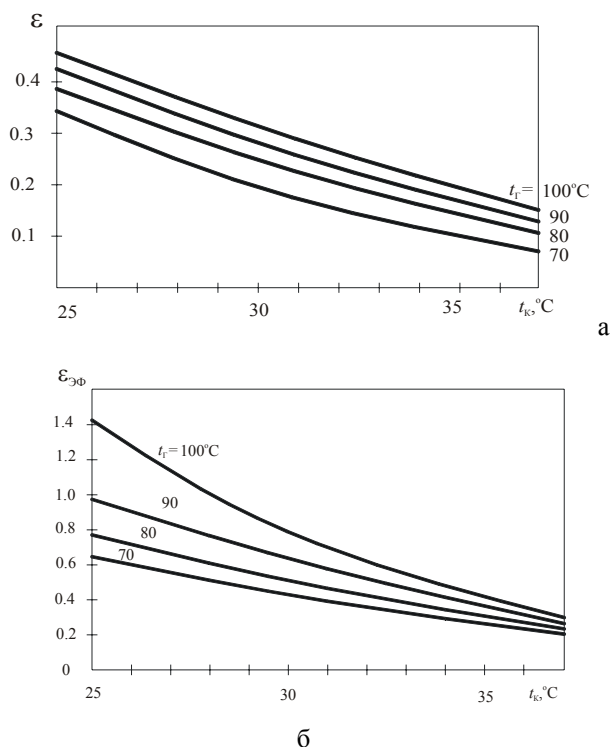


Рис. 5. Зависимость холодильного коэффициента ϵ (а) и эффективного холодильного коэффициента $\epsilon_{эф}$ (б) от температуры конденсации t_k при разных температурах генерации t_r и $t_0 = 5\text{ °C}$

Холодильный коэффициент ϵ рассчитывался как отношение холодопроизводительности Q_0 к количеству теплоты, подведенной в генераторе Q_r , т.е. $\epsilon = Q_0 / Q_r$, где $Q_r = Q_{ост} + Q_{вт}$, а $Q_{ост}$ и $Q_{вт}$ – количество теплоты, подведенной к генератору соответственно с острым паром (от парового котла) и с паром вторичного вскипания от выпарного аппарата. При расчете же эффективного холодильного коэффициента $\epsilon_{эф}$ теплота $Q_{вт}$, подведенная к генератору со вторичным паром, не учитывалась. $Q_r = Q_{ост}$, т.е. во внимание принимались только первичные затраты энергии – в паровом котле. Как видно из рис. 5, б, при $t_k = 25...40\text{ °C}$ значения $\epsilon_{эф}$ лежат в диапазоне 0,3...1,4 и при низких t_k (низких температурах охлаждающей конденсатор ЭХМ воды) могут даже превосходить ϵ для абсорбционных

холодильных машин, что свидетельствует о перспективности применения ЭХМ в системах технологического и комфортного кондиционирования воздуха.

Используя тепло вторичного пара от РМУ А1-ИЖР для фреоновой эжекторной холодильной машины, работающей на R 142b, можно произвести до 84 кВт холода, которого достаточно для охлаждения муки в РМУ и кроме того можно использовать для охлаждения воздуха в общесудовой системе кондиционирования. При этом холодильный коэффициент ϵ составляет 0,16, а эффективный холодильный коэффициент (без учета затрат теплоты на производство вторичного пара) $\epsilon_{\text{эф}} = 0,3$.

3. Выводы и перспектива использования результатов

Обоснована целесообразность использования теплоты вторичного пара выпарных аппаратов для производства холода в эжекторных холодильных машинах систем технологического и комфортного кондиционирования.

Установлено, что при температурах конденсации 25...40 °С значения эффективного холодильного коэффициента $\epsilon_{\text{эф}}$ лежат в диапазоне 0,3...1,4. При низких температурах воды, охлаждающей конденсатор ЭХМ, значения $\epsilon_{\text{эф}}$ превосходят ϵ для абсорбционных холодильных машин, что свидетельствует о перспективности применения теплоиспользующих ЭХМ в системах технологического и комфортного кондиционирования воздуха (при температурах кипения в испарителе-воздухоохладителе $t_0 = 5...10$ °С).

Эжекторные теплоиспользующие установки отличаются высокой надежностью работы благодаря отсутствию механического компрессора, исключительной простотой конструкции, низкими капитальными и эксплуатационными затратами, малой трудоемкостью монтажных работ. Монтаж установок может быть произведен в течение 2 – 3 дней, что делает их весьма привлекательными при

модернизации уже находящихся в эксплуатации выпарных аппаратов.

Внедрение эжекторных установок, использующих вторичный пар, традиционно сбрасываемый в виде конденсата в систему канализации, будет способствовать защите окружающей среды от загрязнения.

Эжекторные теплоиспользующие установки могут применяться в пищевой (рыбоперерабатывающей, молочной, мясной, сахарной, спиртовой), химической, нефтехимической и других отраслях промышленности, где имеется избыток вторичного пара.

Литература

1. Уваров А.А. Судовые рыбомучные установки.– М.: Пищевая промышленность, 1980.- 180 с.
2. Романов А.А. Справочник по рыбомучным установкам и оборудованию.– М.: Пищевая промышленность, 1978.- 220 с.
3. Горбатюк В.И. Процессы и аппараты пищевых производств.– М.: Колос, 1999.— 335 с.
4. Чернобыльский И.И. Выпарные установки. Основы теории и расчет.– К.: Изд-во киевского университета, 1960.- 240 с.
5. Петренко В.А. Принцип выбора рабочего вещества для эжекторной холодильной машины // Холодильная техника и технология.– 2001.– № 1 (70).– С. 16–21.
6. Петренко В.А. Теоретическое и экспериментальное исследование эжекторной холодильной машины в режиме кондиционирования воздуха // Холодильная техника и технология.– 2001.– № 2 (71).– С. 12–18.
7. Максимов Б.Н., Баранов В.Г., Серушкин И.Л. Промышленные фторорганические продукты: Справ. издание.– Л.: Химия, 1990.– 464 с.

Поступила в редакцию 05.06.03

Рецензенты: д-р техн. наук, профессор Г.А. Горбенко, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», г. Харьков; канд. техн. наук, доцент Г.Б. Талда, Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет, г. Харьков.