

Д. Г. Калишук, доц., к-т. техн. наук;  
Н. П. Саевич, к-т. техн. наук;  
Д. И. Чиркун, к-т. техн. наук;  
А. Э. Левданский, доц., д-р. техн. наук;  
Е. В. Опимах, аспирант  
(БГТУ, г. Минск)

## **ИССЛЕДОВАНИЯ И ОПЫТНО-ПРОМЫШЛЕННЫЕ ИСПЫТАНИЯ ТЕПЛООБМЕННИКОВ СМЕШЕНИЯ ПАР-ЖИДКОСТЬ**

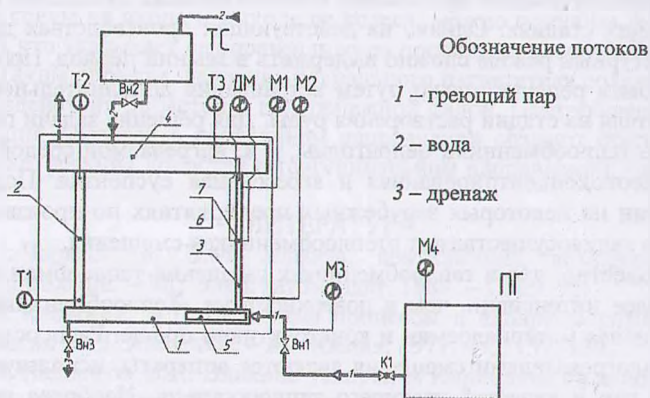
Рациональное поддержание температурных режимов проведения технологических процессов, установленных технологическими регламентами химических и родственных производств, во многих случаях обеспечивает снижение себестоимости продукции. При этом повышается глубина переработки сырья, а также снижаются удельные расходы вспомогательных материалов и энергии, уменьшается образование побочных продуктов. Например, при производстве хлорида калия по галургическому методу температура щелока на выходе из второго растворителя руды должна составлять от 94°C до 97°C. При указанных условиях обеспечивается оптимальное выщелачивание руды, сбалансированное протекание технологических процессов на последующих стадиях. Однако на действующих производствах данный температурный режим сложно выдержать в зимний период. Проблема может быть решена только путем встраивания дополнительного подогревателя на стадии растворения руды. Для решения задачи поверхностные теплообменники непригодны, т. к. нагреваемой средой является высококонцентрированная и агрессивная суспензия. Подогрев суспензии на некоторых зарубежных предприятиях по производству хлорида калия осуществляют в теплообменниках смешения.

Известно, что в теплообменниках смешения теплообмен протекает более интенсивно, чем в поверхностных. Теплообменники смешения менее материалоемки и конструктивно проще. Распространеными подогревателями смешения являются аппараты, использующие острый пар в качестве греющего теплоносителя. Наиболее распространены смесительные подогреватели жидких сред барботажного и струйного типов.

Струйные теплообменники-подогреватели компактны, легко встраиваются в технологическое оборудование (реакторы, растворители и т. д.) и трубопроводы. Установка и эксплуатация струйных теплообменников смешения внутри аппаратов в отдельных случаях может быть нежелательна и даже недопустима из-за динамических воздейст-

вий высокоскоростной струи на элементы конструкции, а также из-за негативного влияния кавитационных эффектов. В таком случае применимы варианты использования вынесенных теплообменников смешения. В обоих случаях предпочтительны, как конструктивно и технологически более простые, аппараты с подачей струи пара в жидкость. Однако как в учебной [1], так и в фундаментальной научной литературе [2,] и периодических научных изданиях информация по расчетам, конструированию и режимах работы струйных теплообменников смешения с подачей пара в нагреваемую жидкость отсутствует.

Нами были разработаны модель вынесенного циркуляционного теплообменника смешения и экспериментальная установка для его исследований, схема которой представлена на рис. 1. Теплообменник представляет собой емкость 4, соединенную циркуляционными трубами 2 и 3 с аппаратом для подвода острого пара 1. Внутри корпуса 1 устанавливалось эжекционно-теплообменное устройство 5. Для контроля текущих значений температуры в различных зонах теплообменника были установлены термометры Т1–Т3, для определения давления пара – манометры М3 и М4. Весь теплообменник был выполнен из органического стекла, что позволяло вести визуальные наблюдения в ходе эксперимента.



- 1 – аппарат для подвода острого пара; 2 – горячая труба циркуляционного контура; 3 – холодная труба циркуляционного контура; 4 – емкость; 5 – устройство эжекционно-теплообменное (эжектор); ПГ – парогенератор; ТС – термостат; М1 и М2 – пьезометры; М3 – манометр образцовый; М4 – манометр; Т1 – Т3 – термометры; Вн1 – Вн3 – вентили; К1 – кран

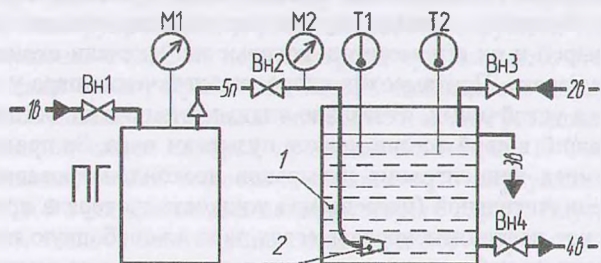
Рисунок 1 - Схема экспериментальной установки

Экспериментальные исследования проводились при двух вариантах исполнения аппарата для подвода острого пара: с соплом в качестве эжекционно-теплообменного устройства и с соплом и эжекционной трубой. При выполнении опытов поддерживалось избыточное давление острого пара на входе в сопло до 40 кПа. При этом скорость истечения пара из сопла составляла до 125 м/с. При небольших скоростях истечения пара наблюдалась нестабильная и малоинтенсивная работа теплообменника. В таких случаях пар из сопла выходил в виде крупных пузырей и их агломератов, которые не успевали сконденсироваться в аппарате. При высоких скоростях истечения пара у сопла образовывался устойчивый, отчетливо видимый паро-жидкостной факел, включавший в свой состав мелкие пузырьки пара. За пределами факела объемная концентрация пузырьков несконденсировавшегося пара была незначительной (нагреваемая жидкость не теряла прозрачности). Проскок несконденсировавшегося пара на свободную поверхность жидкости не наблюдался даже при нагреве воды до температуры 94°C.

Нами также проведены поисковые экспериментальные исследования по определению основных характеристик емкостного теплообменника смешения свстроенными струйными устройствами для подвода острого пара. Схема экспериментальной установки представлена на рис. 2. При выполнении опытов вода подвергалась нагреванию острым паром в цилиндрической емкости диаметром 0,38 м, выполненной из органического стекла. Уровень жидкости в емкости при проведении опытов поддерживался постоянным. Устройства для подвода острого пара устанавливались на заглублении 0,34 м от свободной поверхности жидкости. Использовалось два устройства: сопло диаметром 7,6 мм и коллектор с четырьмя соплами диаметром 3,8 мм. Температура нагреваемой воды при проведении опытов измерялась двумя электронными термометрами в точках, расположенных в одной диаметральной плоскости. Также образцовым манометром измерялось давление пара на входе в сопла. Расход пара, его скорость на выходе из сопел и подводимая в аппарат тепловая мощность определялись расчетным путем при решении уравнений материального и теплового баланса.

Установлено, что при небольших скоростях пара на выходе из сопла теплообменник работает неустойчиво и неэффективно из-за проскока крупных пузырей пара на свободную поверхность жидкости. При высоких скоростях пара в жидкости на выходе из сопел образуются устойчивые парожидкостные факелы, и работа аппарата стабилизируется. При этом в исследованных диапазонах изменения режи-

мов работы достигалась полная конденсация острого пара в воде. Отмечено, что скорость нагрева воды не зависит от разности температур теплоносителей, а зависит только от расхода острого пара. Также визуально выявлено, что использование многосоплового устройства предпочтительно из-за уменьшения вертикального размера зоны активного теплообмена (области существования парожидкостных факелов).



1 – емкость; 2 – устройство ввода пара; Вн1–Вн4 – вентили;

M1 и M2 – манометры; ПГ – парогенератор; T1 и T2 – термометры.

Потоки: 1в – вода на подпитку парогенератора; 2в – вода на заполнение емкости;

3в – линия перелива воды; 4в – слив воды; 5п – пар

**Рисунок 2 - Схема экспериментальной установки**

В результате лабораторных исследований и их анализа были разработаны на уровне технического предложения два варианта исполнения опытно-промышленного аппарата для подогрева продуктов взаимодействия на стадии растворения сальвинитовой руды: вынесенного и встраиваемого в растворитель. По итогам технической экспертизы к изготовлению и последующим испытаниям была принята конструкция встраиваемого аппарата, как более надежная и простая. В ходе опытно-промышленных испытаний указанного аппарата, проведенных на сальвинитовой обогатительной фабрике четвертого рудоуправления ОАО «Беларуськалий», были подтверждены ее работоспособность и эксплуатационная надежность. Положительные результаты испытаний по некоторым параметрам превзошли прогнозные. Например, максимальная тепловая мощность опытно-промышленного образца аппарата составила 3,5 МВт при прогнозируемой расчетной 2,2 МВт.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Теплотехника: Учеб. для вузов / В. Н. Луканин, М. Г. Шатров, Г. М. Камфер и др.: Под ред. В. Н. Луканина – 2-е изд. перераб. – М.: Высш. шк., 2000. – 671 с.

2. Соколов, Е. Я. Струйные аппараты / Е. Я. Соколов, Зингер Н. М. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 352 с.