

5. Расчет и проектирование термических деаэраторов. РТМ 108.030.21-78 / В. А. Пермяков, А. С. Гиммельберг, Г. М. Виханский, Ю. М. Шубников. Л.: НПО ЦКТИ. 1979. – 130 с.
  6. Расчет минимального удельного расхода пара / О. В. Пазушкина, В. С. Врясов. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2021613479. Рег. от 09.03.2021.
  7. Шарапов В. И., Пазушкина О. В. Исследование и разработка технологий термической деаэрации воды на теплоисточниках // Труды Академэнерго. 2008. № 1. С. 84–98.
  8. Ледуховский Г. В. Экспериментальные исследования и моделирование процессов удаления из воды углекислоты в деаэраторах атмосферного давления // Вестн. ИГЭУ. 2016. Вып. 3. С. 5–13.
- 

УДК 621.1.016

## **ИССЛЕДОВАНИЯ ВЫНОСНОГО КОНТАКТНОГО ПОДОГРЕВАТЕЛЯ ЖИДКОСТИ**

**Д. Г. Калишук, Н. П. Саевич, А. А. Ковалева, А. Э. Левданский**

*Белорусский государственный технологический университет, г. Минск*

Контактные теплообменники достаточно широко применяются в химической, горноперерабатывающей и пищевой промышленности и других сферах человеческой деятельности для нагрева чистых жидкостей, а также растворов и суспензий [1–3]. Теплообмен в таких аппаратах протекает более интенсивно по сравнению с поверхностными, а сами теплообменники обладают меньшей материалоемкостью и стоимостью, они проще по конструкции и в эксплуатации. Недостатком контактных теплообменников является то, что они применимы в случаях, когда допускается смешение нагреваемой технологической среды с греющим агентом.

Высокая интенсивность теплообмена в контактных подогревателях по сравнению с поверхностными объясняется непосредственным вводом острого пара в нагреваемую среду. Нагрев острым паром имеет следующие преимущества по сравнению с нагревом глухим паром:

- при использовании острого пара отсутствует термическое сопротивление твердой разделяющей стенки;
- движение и конденсация паровых пузырей вызывает дополнительное перемешивание и активную турбулизацию жидкости, что интенсифицирует теплопередачу;
- эксплуатация оборудования более стабильна во времени, так как требуется меньше остановок аппаратуры на очистку.

В большинстве случаев при нагреве острым паром используются контактные подогреватели жидких сред барботажного и струйного типов.

В настоящее время проявляется значительный интерес к применению струйных теплообменников на объектах энергетики. Эти аппараты привлекательны прежде всего низкими капитальными и эксплуатационными затратами по сравнению с кожухотрубчатыми, пластинчатыми и другими поверхностными подогревателями. Струйные аппараты широко рекламируются и активно продвигаются на рынке теплотехнического оборудования, в частности в Российской Федерации массово производятся струйные теплообменники смешения марок ПСА, ТСА, «Фисоник», «Транссоник», СФА, «Коссет», УМПЭУ [4, 5].

Струйные теплообменники-подогреватели по сравнению с барботажными компактны, они легко встраиваются в технологическое оборудование (реакторы, растворители и т. д.) и трубопроводы. Однако установка и эксплуатация их внутри емкостных или колонных аппаратов во многих случаях нежелательна из-за динамических воздействий высокоскоростной струи пара на элементы конструкции, а также из-за негативных эффектов, сопряженных с кавитацией, возникающей при конденсации острого пара в нагреваемой жидкой среде. При указанных обстоятельствах применим вариант использования вынесенного контактного теплообменника с вводом пара в жидкость. Он не требует установки насоса для организации циркуляции жидкости и, следовательно, дополнительного расхода энергии на его привод. В учебной и в фундаментальной научной литературе [3, 6–10] информация о расчетах, конструировании и режимах работы подобных струйных контактных теплообменников смешения отсутствует.

Авторами был разработан образец циркуляционного контактного теплообменника-подогревателя, а также экспериментальная установка для его исследований. Схема установки представлена на рис. 1. Установка включает емкость 4, соединенную циркуляционными трубами 2 и 3 с корпусом теплообменного аппарата 1. Внутри корпуса 1 устанавливалось эжекционное устройство 5. Для контроля и измерения текущих значений температуры в различных зонах теплообменника были установлены термометры Т1–Т3, для определения давления пара – манометры М3 и М4. Корпус теплообменника, циркуляционные трубы и емкость были изготовлены из прозрачного материала, что позволяло вести визуальные наблюдения процессов в аппарате в ходе эксперимента.

При проведении опытов емкость 4, корпус теплообменного аппарата 1, циркуляционные трубы 2 и 3 заполнялись водой. Через сопло эжекционного устройства 5 в жидкость подавался острый пар. При работе аппарата устанавливалась активная направленная циркуляция жидкости по замкнутому контуру «емкость 4 – холодная труба 3 – корпус теплообменного аппарата 1 – горячая труба 2 – емкость 4».

В ходе эксперимента определялась динамика изменения температуры среды в различных точках теплообменника и циркуляционных труб установки. Кроме того, проводилась видеосъемка зоны взаимодействия пара с жидкостью и картины течения трассера в циркуляционной трубе 3 при измерении скорости циркуляции. Визуальными наблюдениями оценивался характер взаимодействия пара и жидкости в аппарате.

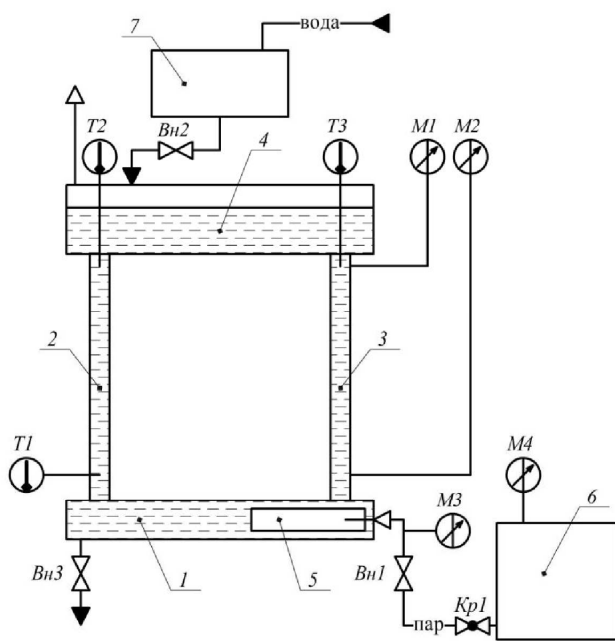


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 – корпус теплообменного аппарата; 2 – горячая труба циркуляционного контура; 3 – холодная труба циркуляционного контура; 4 – емкость; 5 – труба эжектора (эжектор); 6 – парогенератор; 7 – термостат; М1 и М2 – пьезометры; М3 – манометр образцовый; М4 – манометр; Т1–Т3 – термометры; Вн1–Вн3 – вентили; Кр1 – кран

При выполнении опытов расчетное значение скорости истечения пара из сопла составляло от 20 до 125 м/с.

В ходе обработки опытных данных определялись количество тепла на нагрев жидкости, скорость циркуляции, скорость пара на выходе из сопла (скорость истечения), удельный объемный теплосъем и объемный коэффициент теплопередачи и динамика изменения температуры нагреваемой среды.

Визуальные наблюдения за характером взаимодействия пара и нагреваемой жидкости в теплообменном аппарате и горячей трубе циркуляционного контура выявили следующие тенденции. При скорости истечения пара, не превышавшей 50 м/с, теплообменник работал нестабильно и малоинтенсивно. При этом пар из сопла зачастую выходил в виде крупных пузырей и их агломератов. Многие пузыри и агломераты не успевали сконденсироваться в аппарате для подвода пара и в горячей трубе циркуляционного контура. При высоких скоростях истечения пара из сопла образовывался устойчивый, отчетливо видимый парожидкостный факел, включавший в свой состав мелкие, диаметром не более 1,5 мм, пузырьки пара. За пределами данного факела объемная концентрация пузырьков несконденсированного пара была незначительной, и нагреваемая жидкость не теряла прозрачности. Проскок несконденсированного пара на свободную поверхность жидкости в емкости 4 при этом не наблюдался.

На рис. 2 изображены графики, отражающие изменение объемного коэффициента теплопередачи  $K_V$  при различных давлениях пара и исполнениях узла ввода пара. При скоростях истечения 80–125 м/с значение  $K_V$  составляет от 70 до 130 кВт/(м<sup>3</sup> · К). Значение коэффициента теплопередачи при этом возрастает с ростом скорости истечения пара. Объемная плотность теплового потока в аппарате для подвода пара  $q_V$  достигала 3,75 МВт/м<sup>3</sup>.

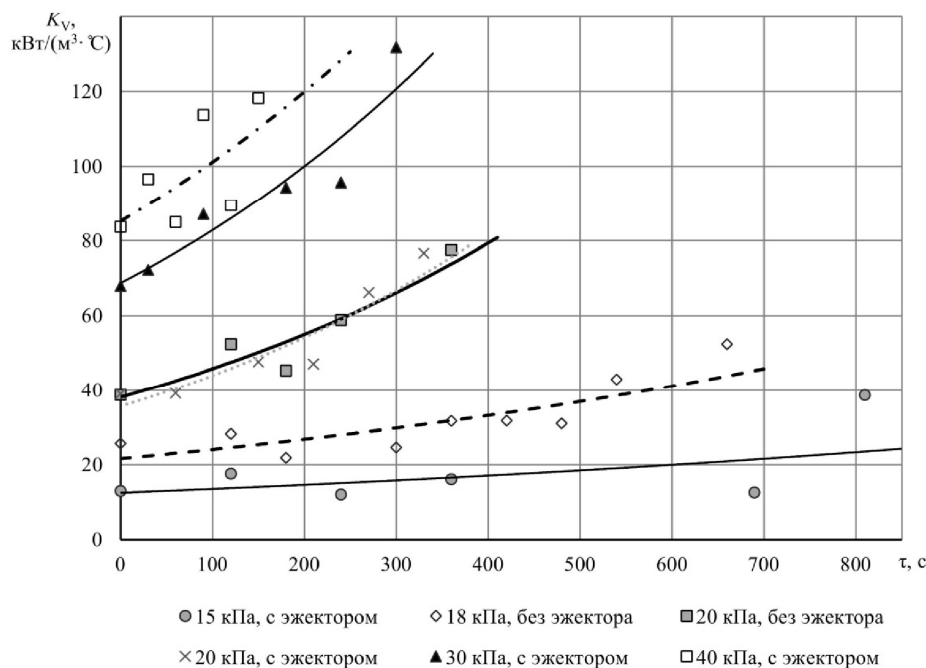


Рис. 2. Зависимость объемного коэффициента теплопередачи  $K_V$  от продолжительности нагрева  $\tau$

Установка дополнительно к соплу трубы эжектора 5 (см. рис. 1) существенно не повлияла на интенсивность теплообмена в подогревателе. Это подтверждается практически совпадающими кривыми, соответствующими избыточному давлению пара 20 кПа с эжектором и без него (рис. 2).

На рис. 3 представлена зависимость объемной плотности теплового потока  $q_V$ , МВт/м<sup>3</sup>, от скорости истечения острого пара  $w_D$ , м/с, для различных вариантов исполнения узла ввода острого пара (с эжектором и без него).

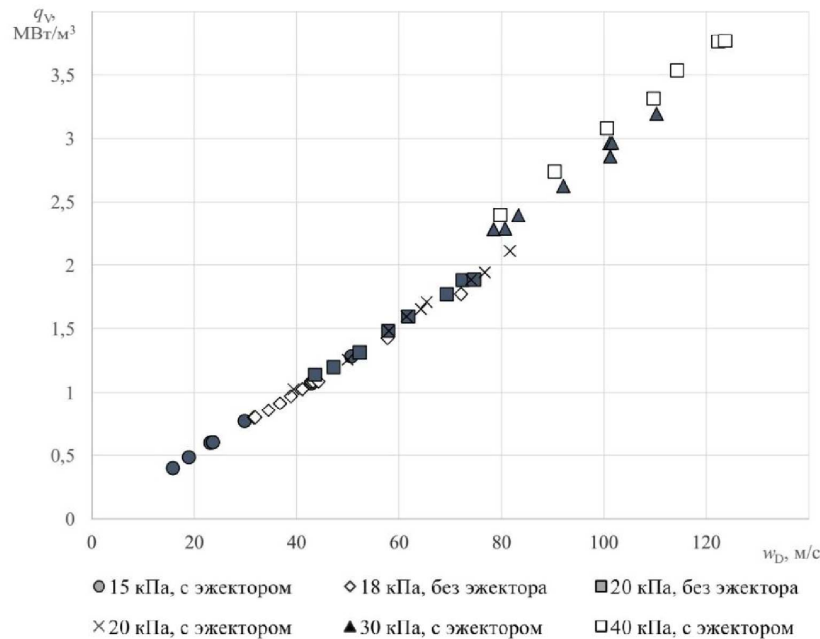


Рис. 3. Зависимость объемной плотности теплового потока  $q_V$  от скорости истечения острого пара  $w_D$

Анализ полученных данных позволил сделать следующие выводы:

- эффективность работы контактного теплообменника зависит от скорости истечения острого пара в нагреваемую жидкость;
- интенсивность теплообмена скачкообразно возрастает при достижении скорости истечения пара из сопла 80 м/с;
- при скорости истечения пара более 80 м/с объемная плотность теплового потока может составлять до 3,75 МВт/м<sup>3</sup>.

Скорость циркуляции нагреваемой жидкости (ее движения в циркуляционных трубах), определялась методом трассирования. При избыточном давлении греющего пара на входе в сопло 30–40 кПа она составляла от 0,3 до 0,6 м/с. Это позволяет рекомендовать применение исследованного теплообменника для нагревания жидкости с механическими включениями.

Исследованный контактный подогреватель имеет простую конструкцию и легко встраивается в существующие емкостные или колонные аппараты. Выносное исполнение теплообменника позволяет исключить влияние динамических воздействий высокоскоростной струи острого пара на элементы конструкции основного аппарата, а также минимизировать негативное влияние кавитационных эффектов. Наличие устойчивой циркуляции позволяет использовать предлагаемую конструкцию для нагрева жидких сред с механическими включениями.

## Литература

1. Касаткин А. Г. Основные процессы и аппараты химической технологии. М.: Альянс, 2004. – 751 с.
2. Теплотехника: учеб. для вузов / В. Н. Луканин [и др.]; под ред. В. Н. Луканина. М.: Высш. шк., 2000. – 671 с.

3. Исаченко В. П., Осипова В. А., Сукомел А. С. Теплопередача. М.: Энергоатомиздат, 1981. – 416 с.
  4. Белевич А. И., Крупцев А. В., Малофеев В. А. О применении паровых инжекторов в теплоснабжении // Энергетик. 2001. № 11. С. 20–22.
  5. Недугов А. Ф., Куркулов М. А. Водоструйный паровой эжектор с камерой предварительного смешения // Промышленная энергетика. 2007. № 1. С. 20–23.
  6. Ермолов В. Ф. и др. Смешивающие подогреватели паровых турбин. М.: Энергоиздат, 1982. – 208 с.
  7. Таубман Е.И. и др. Контактные теплообменники. М.: Химия, 1987. – 256 с.
  8. Соколов Е. Я., Зингер Н. М. Струйные аппараты. М.: Энергоатомиздат, 1989. – 352 с.
  9. Цегельский В. Г. Двухфазные струйные аппараты. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2003. – 408 с.
  10. Соснин Ю. П. Контактные водонагреватели. М.: Стройиздат, 1974. – 359 с.
- 

УДК 620.91

## РАСЧЁТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ В ЭНЕРГЕТИЧЕСКОМ КОТЛЕ ПРИ ВНЕДРЕНИИ СХЕМЫ СТУПЕНЧАТОГО СЖИГАНИЯ

**В. А. Кузнецов<sup>1,2</sup>, А. А. Дектерев<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup>*Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Россия*

<sup>2</sup>*Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, г. Новосибирск, Россия*

В структуре мирового потребления топливно-энергетических ресурсов доля угля по-прежнему остаётся большой. Основным негативным моментом использования этого вида топлива является тот факт, что уголь является самым неэкологическим энергоносителем [1]. В связи с этим угольная энергетика требует применения экологически чистых, энергоэффективных и ресурсосберегающих технологий.

При сжигании угля одним из основных негативных воздействий на окружающую среду являются выбросы оксиды азота ( $\text{NO}_x$ ). Применение схемы стадийного сжигания пылеугольного топлива для снижения содержания оксидов азота в уходящих дымовых газах показало положительный эффект [2–6]. Традиционно на котлах в виде восстановительного топлива используют рядовое пылеугольное топливо. В ряде исследований в качестве топлива для дожигания используется уголь микропомола (micronized coal). Дожигание угля микропомола позволяет не только снизить механический недожог, но также снизить выбросы  $\text{NO}_x$ . В работе [5] на основе экспериментальных и теоретических исследований показана эффективность использования угля микропомола при дожигании по сравнению с дожиганием обычного угля. Рассмотрены два механизма снижения образования  $\text{NO}$ , связанных именно с маленьким размером угольных частиц (6,82–25,10 мкм). Изучено превращение  $\text{NO}$  в цианистый водород ( $\text{HCN}$ ) при взаимодействии с различными углеводородными фрагментами, а также окисление  $\text{HCN}$  за счет объединения с кислородсодержащими группами. Влияние наличия высокой концентрации  $\text{CO}_2$  при дожигании угля супертопкого микропомола на снижение  $\text{NO}_x$  показано в работе [6]. В работе [7] приведено численное исследование влияния дожигания угля микропомола и механоактивированного угля микропомола на снижение  $\text{NO}_x$  и уровень не сгоревшего твердого углерода в котле с тангенциальной топкой. Показано, что использование механоактивированного угля микропомола позволяет снизить  $\text{NO}_x$  на 49% от варианта