

УДК 621.1.016

Д. Г. Калишук, Н. П. Саевич, А. Э. Левданский, Д. И. Чиркун, Е. В. Опимах  
Белорусский государственный технологический университет

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СТРУЙНЫХ ТЕПЛООБМЕННИКОВ СМЕШЕНИЯ

Поддержание регламентного температурного режима при растворении сильвинитовой руды в производстве хлорида калия зачастую является сложной производственной задачей, для решения которой необходимо соответствующее теплообменное оборудование. В работе обоснована возможность применения струйных теплообменников смешения для стабилизации температурного режима в растворителе сильвинитовой руды. Проанализированы различные конструкции струйных теплообменников и выявлены наиболее подходящие для эксплуатации в технологии калийных удобрений. Созданы лабораторные установки для исследования циркуляционного и емкостного струйных теплообменников, дано краткое описание исследованных модификаций аппаратов. Приведены результаты экспериментальных исследований и обработки опытных данных, а также их анализ. Изложены данные о теплотехнических характеристиках и режимах работы испытанных моделей. Доказана возможность применения аппарата, разработанного на основе результатов лабораторных исследований, для нагрева среды в растворителе сильвинитовой руды и стабилизации его температурного режима. Показаны результаты опытно-промышленных испытаний струйного теплообменника «пар – жидкость» на стадии растворения.

**Ключевые слова:** теплообменник, смешение, острый пар, растворитель, руда, хлорид калия, струйный аппарат.

D. G. Kalishuk, N. P. Saevich, A. Ye. Levdanskiy, D. I. Chirkun, Ye. V. Opimakh  
Belarusian State Technological University

### EXPERIMENTAL STUDIES OF JET MIXING HEAT EXCHANGERS

Maintaining routine temperature by dissolving the sylvinit ore in the production of potassium chloride is often a complex production problems, for which solutions must be appropriate heat exchangers. The work proved the possibility of jet mixing heat exchangers for stabilizing the temperature in a solvent sylvinit ore. We analyzed different designs of jet heat exchangers and identified the most suitable for use in potash technology. Created laboratory setup for studying the circulation and capacitive jet heat exchangers, a brief description of the studied modifications of vehicles. The results of experimental research and processing of experimental data and their analysis. It sets out details of the thermal characteristics and operating conditions tested models. The possibility of application apparatus designed on the basis of laboratory tests, for heating in a solvent medium sylvinit ores and stabilize its temperature. The results of pilot tests of the jet heat exchanger “vapor-liquid” on the stage of dissolution.

**Key words:** a heat exchanger, mixing, direct steam, solvent, ore, potassium chloride, jet apparatus.

**Введение.** Поддержание температурных режимов проведения технологических процессов, установленных технологическими регламентами химических и родственных производств, обеспечивает требуемое качество продукции, а также способствует снижению ее себестоимости. При этом увеличивается глубина переработки сырья и, как правило, снижаются удельные расходы вспомогательных материалов и энергии, уменьшается образование побочных продуктов. При производстве хлорида калия по галургическому методу температура щелока на выходе из первого растворителя руды должна поддерживаться в диапазоне значений от 93 до 98°C. При регламентных температурных условиях достигается наиболее полное растворение хлористого калия, а также сбалансированное протекание технологических про-

цессов на стадиях обесшламливания щелоков и кристаллизации. Однако на действующих производствах регламентный температурный режим сложно выдержать в зимний период. В связи с этим на некоторых предприятиях Российской Федерации, Канады и Германии по производству хлорида калия применяется дополнительный нагрев растворяющих щелоков непосредственно в растворителях руды [1, 2]. Для решения данной задачи поверхностные теплообменники не применяются, так как нагреваемой средой является высококонцентрированная и агрессивная суспензия. На российских предприятиях для подогрева смеси растворяющего щелока и руды вводят острый пар через дюзы [1, 2]. Известно, что подогрев суспензии в растворителях сильвинитовой руды на предприятиях дальнего зарубежья также осуществ-

ляют с использованием теплообменников смешения. Однако конструктивно-технологические параметры как российских, так других подогревателей в открытых источниках информации не раскрываются.

Целью работы являлось экспериментальное определение теплотехнических характеристик теплообменников смешения, изучение режимов их работы, а также разработка на основании полученных данных промышленного образца аппарата для стабилизации температурного режима в растворе силвинитовой руды.

**Основная часть.** Наиболее простым в аппаратурно-технологическом оформлении промышленным способом нагрева жидких сред является их нагрев острым паром, т. е. паром, подаваемым непосредственно в нагреваемую среду [3–5]. Относительная простота аппаратурного оформления нагрева жидкостей острым паром способствует применению такого способа во многих отраслях промышленности.

Указанный выше способ передачи тепла жидким средам имеет некоторые преимущества по сравнению с нагревом глухим паром. При конденсации острого пара внутри нагреваемой среды отсутствует термическое сопротивление твердой стенке, разделяющей теплоносители, а также термические сопротивления загрязнений на поверхностях этой стенки. Кроме того, конденсация паровых пузырей в жидкости вызывает ее интенсивное перемешивание, что положительно влияет на теплопередачу. Следствие этого интенсивность теплообмена при нагреве острым паром выше, чем при использовании глухого. При этом процесс нагрева более стабилен во времени, так как не требует частых остановок теплообменной аппаратуры на очистку. Однако нагрев острым паром имеет и недостатки. Данный способ подвода тепла к жидким средам возможен только при допущении разбавления обогреваемой среды конденсатом. Поэтому использование острого пара, как правило, ограничивается нагревом воды и водных растворов. Кроме того, конденсация острого пара в той или иной мере сопровождается негативными воздействиями кавитационных явлений, в том числе шумом, возникновением вибрации оборудования, эрозионным и коррозионным разрушением конструктивных элементов в зоне конденсации.

Для эффективного взаимодействия острого пара и нагреваемой жидкости необходимо получить развитую поверхность взаимодействующих фаз. Это может быть достигнуто за счет диспергирования пара или жидкости с помощью различных струйных устройств. Широкое применение, особенно в энергетике, получили противоточные струйные аппараты (на-

пример, тарельчатые деаэраторы, насадочные декарбонизаторы, контактные конденсаторы, утилизаторы тепла паров и т. п.) [6, 7]. Они имеют простую конструкцию, но громоздки.

Существенно меньшие размеры у прямооточных струйных устройств. В них взаимодействие двух фаз обеспечивается за счет подвода механической энергии (подачи под давлением) одному или нескольким потокам. В случае нагрева жидкостей острым паром возможны два принципиально отличающихся варианта организации взаимодействующих потоков. Если рабочим телом (поток к которому подводится энергия) является жидкость, то устройства называются инжекторами типа «жидкость – пар», если же рабочим телом является острый пар, то их называют инжекторами типа «пар – жидкость» [8–10].

Струйные прямооточные теплообменники-подогреватели компактны, легко встраиваются в технологическое оборудование (реакторы, растворители и т. д.) и трубопроводы. Эти аппараты привлекательны прежде всего низкими капитальными и эксплуатационными затратами по сравнению с кожухотрубчатыми, пластинчатыми и другими поверхностными подогревателями. Они широко эксплуатируются и продвигаются на рынке энергетического оборудования, о чем свидетельствуют статьи [11, 12], сайт компании Spiraxsarco [13], многочисленные патенты. В Российской Федерации массово производятся струйные теплообменники смешения марок ПСА, ТСА, «Фисоник», «Трансоник», СФА, «Коссет», УМПЭУ.

Как уже упоминалось выше, эксплуатация струйных теплообменников внутри аппаратов может быть нежелательна и даже недопустима из-за динамических воздействий высокоскоростной струи на элементы конструкции, а также из-за негативного влияния кавитационных эффектов. В таком случае возможно использование вынесенных теплообменников смешения. Предпочтительно применение конструктивно более простых аппаратов с подачей струи пара в жидкость.

В учебной [3–5] и фундаментальной научной литературе [7–10], периодических научных изданиях содержатся сведения описательного характера об аппаратурно-технологическом оформлении процессов нагрева жидких сред острым паром. В них отсутствует информация по расчетам, конструированию и режимам работы струйных теплообменников смешения. Исключением является методика расчета инжекторов типа пар – жидкость, представленная в монографии [8].

Паровые дюзы, которые являются наиболее простым известным конструктивным решени-

ем, пригодным для использования в растворителях сильвинитовой руды, имеют следующие существенные недостатки:

- повышенные собственные вибрацию и эрозийный износ;

- «бесшумные» дюзы в виде инжекторов неустойчивы в работе и имеют невысокую эффективность.

Наиболее перспективными, по нашему мнению, для применения в растворителях сильвинитовой руды являются струйные теплообменники «пар – жидкость». Нами осуществлены разработка и экспериментальные исследования такого теплообменника в двух вариантах исполнения:

- в виде вынесенного аппарата, соединенного с растворителем циркуляционными линиями;

- в виде устройства, вмонтированного в одну из секций растворителя.

Модель вынесенного циркуляционного струйного теплообменника смешения и экспериментальная установка для его исследований, представлены 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 текущих значений температуры в различных зонах теплообменника были установлены термометры  $T1-T3$ , для определения давления пара – манометры  $M3$  и  $M4$ . Весь теплообменник был выполнен из органического стекла, что позволяло вести визуальное наблюдения и видеосъемку в ходе эксперимента. Емкость 4 имитирует корпус растворителя сильвинитовой руды.

Корпус теплообменного аппарата 1 соединен паропроводом с парогенератором  $ПГ$ . Для заполнения струйного циркуляционного аппарата смешения предварительно подогретой водой использовался термостат  $ТС$ . В нижней части корпуса теплообменного аппарата 1 выполнен штуцер с вентилем  $Вн3$  для слива жидкости. Расход и параметры пара, поступающего из парогенератора  $ПГ$  в корпус теплообменного аппарата 1, регулировались краном  $К1$  и вентилем  $Вн1$ . Давление пара в парогенераторе (индикационная величина) контролировалась по манометру  $M4$ .

Давление пара на входе в сопло струйного аппарата 5 измерялась с помощью образцового манометра  $M3$  (цена деления – 0,5%, диапазон измеряемого избыточного давления – от 0 до 60 кПа). С помощью этого же манометра измерялось избыточное давление в зоне подвода острого пара в корпус теплообменного аппарата. Температура воды определялась электронными термометрами  $T1, T2$  и  $T3$  в трех точках:

на входе в горячую трубу циркуляционного потока 2 термометром  $T1$ ; на входе в холодную трубу циркуляционного потока 3 термометром  $T3$ ; на выходе из горячей трубы циркуляционного потока 2 термометром  $T2$ . Разрешающая способность термометров составляла  $0,1^{\circ}C$ , погрешность при измерении температуры – не более  $0,3^{\circ}C$ .

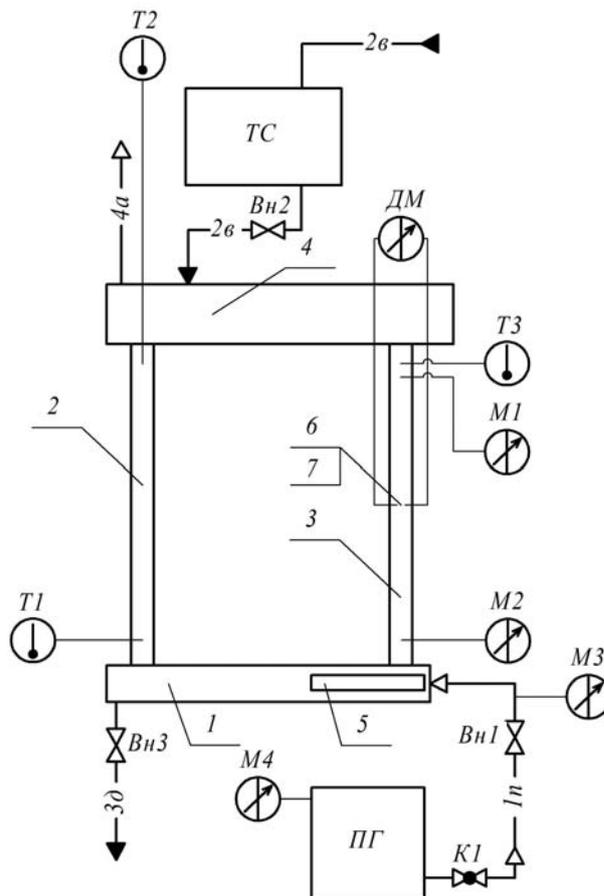


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для исследований циркуляционного теплообменника:

- 1 – корпус теплообменного аппарата;
  - 2 – горячая труба циркуляционного контура;
  - 3 – холодная труба циркуляционного контура;
  - 4 – емкость; 5 – устройство эжекционное;
  - $ПГ$  – парогенератор;  $ТС$  – термостат;
  - $M1$  и  $M2$  – пьезометры;  $M3$  – манометр образцовый;
  - $M4$  – манометр;  $T1-T3$  – термометры;
  - $Вн1-Вн3$  – вентили;  $К1$  – кран.
- Обозначение потоков:  $1п$  – греющий пар;  $2в$  – вода;  $3д$  – дренаж;  $4а$  – сообщение с атмосферой

Для индикации возникновения циркуляции воды в теплообменнике к холодной трубе циркуляционного потока 3 были присоединены стеклянные пьезометры  $M1$  и  $M2$ . При движении жидкости в трубе со скоростью, превышающей  $0,2$  м/с, в пьезометре  $M2$  наблюдался меньший по сравнению с пьезометром  $M1$  уро-

вень воды. Для измерения динамического давления и расчетов скорости движения жидкости на оси холодной трубы циркуляционного потока 3 была установлена трубка Пито, состоящая из трубок полного давления 6 и статического давления 7. Трубки 6 и 7 соединялись с дифференциальным манометром ДМ.

При проведении экспериментов емкость 1, корпус 2, циркуляционные трубы 3 и 4 заполняются водой. При необходимости через емкость 1 осуществлялся проток жидкости, т. е. подвод или слив, требуемый для поддержания заданного уровня. Через эжекционное устройство 5 в жидкость подавался острый пар, за счет конденсации которого жидкость в установке нагревалась. Эжекционный эффект в зоне взаимодействия острого пара и жидкости создавал предпосылки для движения последней в направлении от холодной трубы циркуляционного контура 3 к горячей трубе 2. При этом дополнительно возникала разность гидростатических давлений в трубах 3 и 2, так как температура жидкости в трубе 2 больше, чем ее температура в трубе 3. Эти эффекты вызывали направленную циркуляцию жидкости по 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 установки и теплообменника. Также проводилась видеосъемка зоны взаимодействия пара с жидкостью и картины течения трассера в циркуляционной трубе при измерении скорости циркуляции методом трассирования.

Визуальными наблюдениями оценивался характер взаимодействия пара и жидкости в аппарате. Измерить динамическое давление потока жидкости в холодной трубе циркуляционного контура с помощью трубки Пито было возможно только при средней скорости жидкости, превышающей 0,3 м/с.

Экспериментальные исследования проводились при двух модификациях исполнения аппарата для подвода острого пара: с соплом в качестве эжекционного устройства и с соплом и эжекционной трубой. 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 парожидкостной факел, включавший в свой состав только мелкие пузырьки пара. За пределами факела объемная концентрация пузырьков несконденсированного пара была незначи-

тельной. При этом не наблюдался проскок несконденсированного пара на свободную поверхность жидкости.

При обработке опытных данных определялись: количество тепла, использованного на нагрев жидкости в циркуляционном контуре за определенный временной интервал; массовый и объемный расходы циркулирующей через аппарат воды; расчетная скорость циркуляции (скорость воды в холодной трубе циркуляционного контура); массовый и объемный расходы греющего (острого) пара; скорость греющего пара на выходе из сопла эжектора; температура конденсации греющего пара на его входе в жидкость из сопла; абсолютное давление в месте установки сопла; средняя разность температур греющего пара и воды; удельный объемный теплосъем и объемный коэффициент теплопередачи в аппарате.

Выявлено, что объемный коэффициент теплопередачи при высоких скоростях истечения составляет 70–130 кВт/(м<sup>3</sup>·К). Значение коэффициента теплопередачи при этом возрастает с ростом скорости истечения острого пара. Удельный объемный теплосъем достигал 3,75 МВт/м<sup>3</sup>. Установка эжекционной трубы в аппарате подвода острого пара позволяет упорядочить структуру парожидкостного факела. Скорость циркуляции нагреваемой жидкости, определенная методом трассирования, составляла до 0,6 м/с. Это позволяет сделать вывод о применимости исследованного теплообменника для нагревания жидкости с твердыми частицами размером до 30 мкм при их плотности до 2000 кг/м<sup>3</sup>.

Нами также проведены поисковые экспериментальные исследования по определению основных характеристик емкостного теплообменника смешения со струйными устройствами для подвода острого пара. Модель струйного емкостного теплообменника смешения имитирует секцию растворителя сильвинитовой руды с встроенным теплообменником. С целью визуализации процессов, протекающих при взаимодействии острого пара с жидкостью, корпус модельного теплообменника был изготовлен из органического стекла. При исследованиях внутри емкости, заполненной жидкостью, устанавливаются устройства для подачи острого пара в двух конструктивных исполнениях.

Схема экспериментальной установки представлена на рис. 2. Установка включает парогенератор ПГ, соединенный трубопроводом для подачи пара с емкостью 1. Внутри емкости 1 на конце трубопровода закреплено устройство для ввода острого пара 2. Для поддержания постоянного уровня жидкости в ходе эксперимента емкость снабжена переливной линией 4в. Рас-

ход пара, подаваемого из парогенератора ПГ в емкость 1, регулируется вентилем Вн2. Давление пара, поступающего в емкость 1, измеряется образцовым манометром М2. Температура жидкости в емкости измеряется термометрами Т1 и Т2. При проведении эксперимента зонды термометров Т1 и Т2 были заглублены в жидкость на 0,15 м и установлены симметрично в диаметральной плоскости на расстоянии 0,2 м друг от друга.

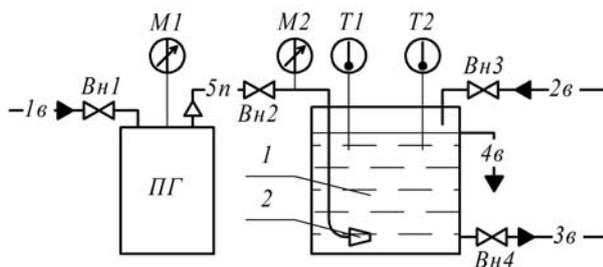


Рис. 2. Схема установки для исследований теплообмена в струйном емкостном теплообменнике:

- 1 – емкость; 2 – устройство для ввода острого пара;
- Вн1–Вн4 – вентили; М1 и М2 – манометры;
- ПГ – парогенератор; Т1 и Т2 – термометры.
- Потоки: 1в – вода на подпитку парогенератора;
- 2в – вода на заполнение емкости; 3в – слив воды;
- 4в – линия перелива воды; 5п – пар

Исследованными устройствами для подвода острого пара являлись одиночное сопло и коллектор с четырьмя соплами. Данные устройства устанавливались внутри емкости на заглублении 0,35 м от свободной поверхности жидкости. При проведении опытов при заданных давлениях пара в соплах определялась динамика изменения температуры воды в емкости. При наладке установки проводилось погружение зондов в жидкость на различную глубину. Было установлено, что при вводе острого пара происходит интенсивное перемешивание жидкости и поэтому отклонение значений ее температуры при изменении глубины погружения от 0,05 до 0,25 м не превышало 0,2°C. Отклонение значений температур, полученных с помощью термометров Т1 и Т2 при одинаковой глубине их погружения, также не превышало 0,2°C. Процесс велся до достижения водой температуры 85–88°C. Также проводились визуальные наблюдения и видеосъемка картины истечения пара из сопел, факела парожидкостной смеси, а также свободной поверхности жидкости.

В ходе обработки опытных данных определялись: количество тепла, используемого на нагрев жидкости за фиксированный временной интервал; массовый и объемный расходы греющего пара; скорость греющего пара на

выходе из сопла; температура конденсации греющего пара на входе в жидкость; разность температур теплоносителей (греющего пара и воды) в аппарате; удельный объемный теплоъем в нем.

В результате исследований емкостного теплообменника установлено, что при небольших скоростях пара на выходе из сопла аппарат работает неустойчиво и неэффективно из-за образования крупных пузырей пара (см. рис. 3) и их проскока на свободную поверхность жидкости.

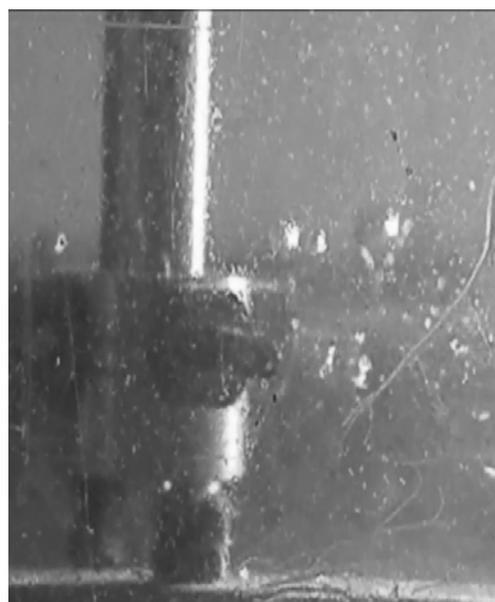


Рис. 3. Крупные пузыри пара в жидкости при неустойчивой работе емкостного теплообменника

При высоких скоростях пара в жидкости на выходе из сопел образуются устойчивые парожидкостные факелы и работа аппарата стабилизируется. В последнем случае достигалась практически полная конденсация острого пара в воде, о чем свидетельствовало отсутствие выхода пузырьков пара на свободную поверхность жидкости.

Установлено, что в исследованном диапазоне изменений температур и расходов скорость нагрева воды не зависит от разности температур теплоносителей, а зависит только от расхода острого пара, определяемого его давлением на выходе из сопла (см. рис. 4).

При этом тепловая мощность аппарата возрастает пропорционально расходу подаваемого острого пара. Также визуально выявлено, что при устойчивой работе аппарата основная часть пара конденсируется в области существования парожидкостного факела (факелов). Использование многосоплового устройства предпочтительно из-за уменьшения

вертикального размера зоны активного теплообмена (области существования парожидкостных факелов). При испытаниях многосоплового устройства высота эффективной зоны теплообмена по сравнению с устройством с одним соплом сокращалась примерно в 2 раза. Были также получены результаты о соотношении длины парожидкостного факела и диаметра сопла. Эта информация позволяет конструировать подобные промышленные теплообменники с исключением или минимизацией динамического воздействия парожидкостной струи на элементы их конструкции.

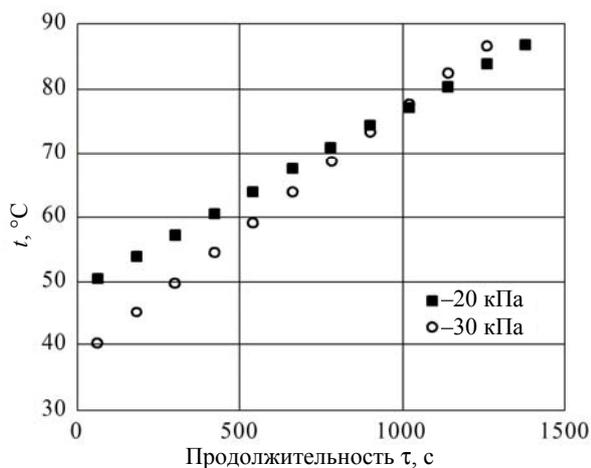


Рис. 4. Динамика изменения температуры жидкости (устройство для ввода острого пара с четырьмя соплами)

По результатам анализа лабораторных исследований были разработаны на уровне технического предложения два варианта исполнения опытно-промышленного аппарата для подогрева продуктов взаимодействия на стадии растворения селвинитовой руды: вынесенного и встраиваемого в растворитель. После проведения технической экспертизы заказчиком к изготовлению и последующим испытаниям была принята конструкция встраиваемого теплообменного аппарата, как более надежная и простая. Схема установленного на растворитель селвинитовой руды опытного образца теплообменника показана на рис. 5.

В ходе опытно-промышленных испытаний указанного аппарата, проведенных на селвинитовой 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 расчетной 2,3 МВт.

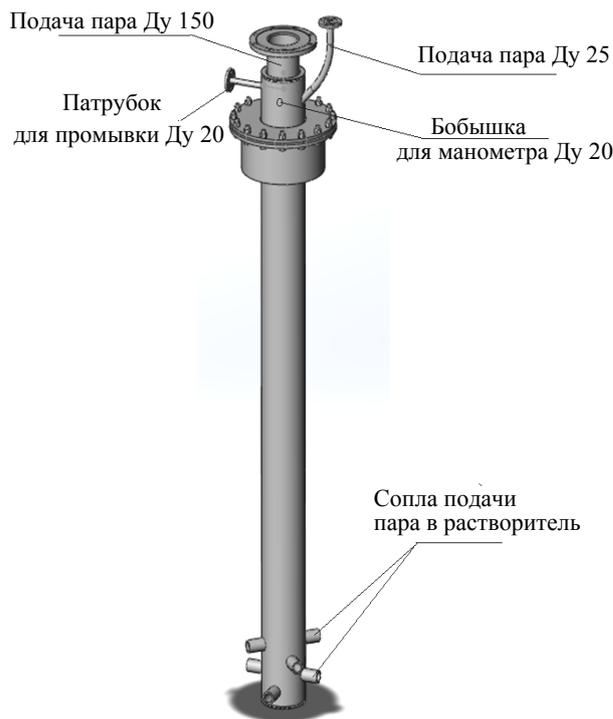


Рис. 5. Опытный образец теплообменника

**Заклучение.** На основе проведенного анализа источников информации по теплообменным аппаратам принято решение о разработке в качестве устройства для стабилизации температурного режима в растворителях селвинитовой руды струйного теплообменника смешения. Разработаны и экспериментально исследованы в лабораторных условиях четыре модификации указанных аппаратов. В результате обработки и анализа экспериментальных данных получена информация о влиянии конструктивных и режимных параметров на эффективность, устойчивость и другие факторы работы исследованных моделей. Лабораторные исследования показали высокую интенсивность теплообмена в струйных теплообменниках «пар – жидкость», где объемный коэффициент теплопередачи достигал 130 кВт/(м<sup>3</sup>·К). Опытный образец струйного теплообменника смешения, разработанный с использованием результатов лабораторного эксперимента, прошел успешные опытно-промышленные испытания. При этом была подтверждена пригодность аппарата для стабилизации температурного режима в растворителях селвинитовой руды.

Результаты, представленные в статье, получены при выполнении научно-исследовательской работы № ХД 13–432 «Провести исследования, разработать конструкцию аппарата подачи острого пара для стабилизации температурного режима на стадии растворения селвинитовой руды в первом растворителе» по заказу ОАО «Беларуськалий».

### Литература

1. Печковский В. В. Технология калийных удобрений. Минск: Вышэйшая школа, 1968. 264 с.
2. Аксельруд Г. А., Молчанов А. Д. Растворение твердых веществ. М.: Химия, 1977. 272 с.
3. Касаткин А. Г. Основные процессы и аппараты химической технологии. М.: Альянс, 2004. 751 с.
4. Теплотехника / В. Н. Луканин [и др.]; под ред. В. Н. Луканина; 2-е изд. перераб. М.: Высшая школа, 2000. 671 с.
5. Исаченко В. П., Осипова В. А., Сукомел А. С. Теплопередача. М.: Энергоатомиздат, 1981. 416 с.
6. Смешивающие подогреватели паровых турбин / В. Ф. Ермолов [и др.]. М.: Энергоиздат, 1982. 208 с.
7. Контактные теплообменники / Е. И. Таубман [и др.]. 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.
11. Белевич А. И., Крупцев А. В., Малофеев В. А. О применении паровых инжекторов в теплообеспечении // Энергетик. 2001. № 11. С. 20–22.
12. Недугов А. Ф., Куркулов М. А. Водоструйный паровой эжектор с камерой предварительного смешения // Промышленная энергетика. 2007. № 1. С. 20–23.
13. Паровые инжекторы [Электронный ресурс]: сайт компании Spirax Sarco. URL: <http://www.spiraxsarco.com/ru/products-services/products/boiler-controls-and-systems/steam-injectors.asp> (дата обращения: 09.02.2015).

### References

1. Pechkovskiy V. V. *Tekhnologiya kaliynykh udobreniy* [Technology of potash fertilizers]. Minsk, Vysheyshaya shkola Publ., 1968. 264 p.
2. Aksel'rud G. A., Molchanov A. D. *Rastvorenije tverdykh veshchestv* [Dissolution of the solids]. Moscow, Khimiya Publ., 1977. 272 p.
3. Kasatkin A. G. *Osnovnye protsessy i apparaty khimicheskoy tekhnologii* [Basic processes and devices of chemical technology]. Moscow, Al'yans Publ., 2004. 751 p.
4. Lukanin V. N., Shatrov M. G., Kamfer G. M. *Teplotekhnika* [Thermotechnics]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 2000. 671 p.
5. Isachenko V. P., Osipova V. A., Sukomel A. S. *Teplotperedacha* [Heat transfer]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1981. 416 p.
6. Ermolov V. F., Permyakov V. A., Efimochkin G. I., Verbitskiy V. L. *Smeshivayushchie podogrevateli parovykh turbin* [Mixing heaters of steam turbines]. Moscow, Energoizdat Publ., 1982. 208 p.
7. Taubman Ye. I., Gornev V. A., Mel'tser V. L. *Kontaknyye teploobmenniki* [Contact heat exchangers]. Moscow, Khimiya Publ., 1987. 256 p.
8. Sokolov Ye. Ya., Zinger N. M. *Struynnye apparaty* [Jet apparatuses]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1989. 352 p.
9. Tsegel'skiy V. G. *Dvukhfaznye struynnye apparaty* [Two-phase jet apparatuses]. Moscow, MGТУ im. N. E. Baumana Publ., 2003. 408 p.
10. Sosnin Yu. P. *Kontaknyye vodonagrevateli* [Contact water heaters]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1974. 359 p.
11. Belevich A. I., Kruptsev A. V., Malofeev V. A. On the application of steam injectors in heat supply. *Energetik* [Energetik], 2001, no. 11, pp. 20–22 (In Russian).
12. Nedugov A. F., Kurkulov M. A. Water-jet steam ejector with pre-mixing chamber. *Promyshlennaya energetika* [Industrial energy], 2007, no. 1, pp. 20–23 (In Russian).
13. Parovye inzhektory: sayt kompanii Spirax Sarco [The steam injectors: Spirax Sarco company website]. Available at: <http://www.spiraxsarco.com/ru/products-services/products/boiler-controls-and-systems/steam-injectors.asp> (accessed 09.02.2015).

### Информация об авторах

**Калишук Дмитрий Григорьевич** – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры процессов и аппаратов химических производств. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: kalishdz@belstu.by

**Саевич Николай Петрович** – кандидат технических наук, доцент кафедры процессов и аппаратов химических производств. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: saevichm@belstu.by

**Левданский Александр Эдуардович** – доктор технических наук, доцент, доцент кафедры процессов и аппаратов химических производств. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: alex\_levdansky@belstu.by

**Чиркун Дмитрий Иванович** – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры процессов и аппаратов химических производств. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: chirkund@belstu.by

**Опимах Евгений Владимирович** – аспирант кафедры процессов и аппаратов химических производств. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: opimah.evgenij@belstu.by

#### Information about the authors

**Kalishuk Dmitriy Grigor'yevich** – PhD (Engineering), Assistant Professor, Assistant Professor, the Department of Processes and Apparatus for Chemical Production. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: kalishdz@belstu.by

**Saevich Nikolay Petrovich** – PhD (Engineering), Assistant Professor, the Department of Processes and Apparatus for Chemical Production. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: saevichm@belstu.by

**Levdanskiy Aleksandr Eduardovich** – DSc (Engineering), Assistant Professor, Assistant Professor, the Department of Processes and Apparatus for Chemical Production. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: alex\_levdansky@belstu.by

**Chirkun Dmitriy Ivanovich** – PhD (Engineering), Senior Lecturer, the Department of Processes and Apparatus for Chemical Production. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: chirkund@belstu.by

**Opimakh Yevgeniy Vladimirovich** – PhD student, the Department of Processes and Apparatus for Chemical Production, Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: opimah.evgenij@belstu.by

*Поступила 22.02.2016*