ISNN 3030-3907

2026/2
VOLUME 3

# DEVELOPMENT OF SCIENCE

## ILMIY JURNAL



# Development of science

## Ilmiy jurnal

2026/2 VOLUME 3

ISSN 3030 -3907

Ilmiy jurnal OAK rayosatining 2024 yil 27 sentabrdagi 361-son qaroriga asosan 02.00.00 kimyo fanlari hamda 2025 yil 12 fevral 367- son qaroriga asosan 05.00.00 texnika fanlari bo‘yicha falsafa doktori (PhD) va fan doktori (DSc) ilmiy darajasiga talabgorlarning dissertatsiya ishlari yuzasidan dissertatsiyalari asosiy ilmiy natijalarini chop etish tavsiya etilgan milliy ilmiy nashrlar ro‘yxatiga kiritilgan.

**BOSH MUHARRIR:**
***Temirov Alisher Hoshim o‘g‘li – texnika fanlari falsafa doktori (PhD),Dotsent.***
**TAHRIRIYAT KENGASH RAISI:**
***Fozilov Sadriddin Fayzullayevich – texnika fanlari doktori, professor***
***TAHRIRIYAT KENGASH A’ZOLARI***

**TEXNIKA FANLARI/ TECHNICAL SCIENCES/ ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ**

***Bozorov G‘ayrat Rashidovich***
*Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor*
***Abdurahmonov Olim Rustamovich***
*Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor*
***Adizov Bobur Zamirovich***
*O‘zbekiston Respublikasi Fanlar akademiyasi Umumiy va noorganik kimyo instituti, professor*
***Hayitov Ruslan Rustamjonovich***
*Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor*
***Jumayev Qayum Karimovich***
*Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.*
***Berdiyev Dorob Murodovich***
*Islom Karimov nomidagi Toshkent Davlat Texnika Universiteti, professor*
***Maxmudov Rafiq Amonovich***
*Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.*
***Tilloyev Lochin Ismatilloyevich***
*Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.*
***Raxmonov Qahramon Sanakulovich***
*Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.*
***Barakayev Nusratullo Rajabovich***
*Islom Karimov nomidagi Toshkent Davlat Texnika Universiteti, professor.*
***Jo‘rayev Xayrullo Fayziyevich***
*Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.*
***Panoyev Erali Rajabboyevich***
*Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.*
***Ataullayev Sherzod Nabiullyevich***
*Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.*
***Murodov Malik Negmurodovich***
*Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.*
***Axmedova Ozoda Bahronovna***
*Islom Karimov nomidagi Toshkent Davlat Texnika Universiteti.*
***Safarov Bahri Jumayevich***
*Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.*
***Xaydarov Axtam Amonovich***
*Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.*
***Safarov Jasur Alijon o‘g‘li***
*Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.*

**KIMYO FANLARI/ CHEMICAL SCIENCES/ ХИМИЧЕСКИЕ НАУКИ**

***Axmedov Voxid Nizomovich***
*Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor*
***Umarov Baqo Bafoyevich***
*Buxoro Davlat Universiteti, professor*
***Kodirov Abduaxad Abduraximovich***
*Qarshi davlat Universiteti, professor*
***Qurbonov Mingniqul Jumagulovich***
*Qarshi davlat Universiteti, dotsent*
***Turemuratov Sharibay Naurizbaevich***
*O‘zbekiston Respublikasi Fanlar akademiyasi Qoraqalpog‘iston bo‘limi Bosh ilmiy kotibi, professor*
***Tursunov Kaxor Shonazarovich***
*Qarshi davlat Universiteti, professor*
***Do‘stov Hamro***
*Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor*
***Panoyev Nodir Shavkatovich***
*Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.*
***Olimov Bobur Bahodir o‘g‘li***
*Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.*
***Kasimov Sherzod Abduazimovich***
*Termiz Davlat Universiteti, professor.*
***Aliqulov Rustam Valiyevich***
*Termiz Davlat Universiteti, professor*
***Tropov Xamza Tursunovich***
*Samarqand Davlat Universiteti, professor*

**IQTISODIYOT FANLARI/ ECONOMICS/ ЭКОНОМИЧЕСКИЕ НАУКИ**

***Nizamov Aslitdin Badreddinovich***
*Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.*
***Boboyev Akmal Choriyevich***
*Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.*
***Ergashxojayeva Shaxnoza Djasurovna***
*Toshkent davlat iqtisodiyot universiteti, professor*
***Saidaxmedova Nodira Ilxomovna***
*Toshkent davlat iqtisodiyot universiteti, professor*
***Muxsinov Bekzod Toxirovich***
*Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.*
***Shakarov Qulmat Ashirovich***
*Renessans ta'lim universiteti,dotsent.*
***Jumaeva Zulfiya Qayumovna***
*Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.*
***Norova Salomat Yusupovna***
*Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.*
***Avezova Shaxnoza Maxmudjonovna***
*Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.*
***Jalilov Jamshid G‘anijonovich***
*Toshkent davlat iqtisodiyot universiteti, dotsent*
***Xasanova Gulruh Djumanazarovna***
*Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.*

**PEDAGOGIKA FANLARI/ PEDAGOGICAL SCIENCES / ПЕДАГОГИЧЕСКИЕ НАУКИ**

***Siddiqova Sadoqat G‘afforovna***
*Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.*
***Zoyirov Erkin Xalilovich***
*Buxoro Davlat Texnika Universiteti, DSc, professor*
***Gaffarov Feruz Hasanovich***
Puchon Universiteti, *professor*
***Ruziyev Davron Yuldashevich***
*Buxoro Davlat Universiteti, professor*
***Muradova Firuza Rashidovna***
*Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.*
***Yunusova Gulandon Samiyevna***
*Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.*
***To‘xtayeva Zebo Sharifovna***
*Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.*
***Navro‘zova Gulchixra Nigmatovna***
*Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.*
***Uzoqova Laylo Polvonovna***
*Buxoro muhandislik – texnologiya instituti, dotsent.*
***To‘raqulova Marjona Qiyom qizi***
*Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.*
***Muradova Zarina Rashidovna***
*Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.*
***Murodov Sanjar Aslonovich***
*Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.*
***Shodiyev Jahongir Jo‘raqulovich***
*Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent*
***Gaffarov Laziz Hasanovich***
*Buxoro muhandislik – texnologiya instituti, dotsent.*

Tahririyat a’zolarning to‘liq ro‘yxati jurnalning www.devos.uz saytida keltirilgan.

Tahririyat hay’ati a’zolarining tarkibini o‘zgartirish hamda qo‘shimcha kiritish yoki tahririyat a’zoligidan chiqarish bosh muharrir tomonidan amalga oshiriladi.



ISSN 3030-3907

**Development of science** ilmiy jurnali 2024 yil 15 aprel kuni №256445 sonli guvohnoma bilan Davlat ro‘yxatidan o‘tgan.

To‘plam elektron ko‘rinishda (pdf formatida) mualliflarga taqdim etiladi. To‘plamga kiritiladigan maqolalarning mazmuni, ulardagi statistik ma’lumotlar va me’yoriy hujjatlarning to‘g‘riligiga hamda har qanday fikr - mulohazalarga mualliflarning o‘zlari mas’ul hisoblanadilar. Talablarga javob bermaydigan maqolalar to‘plamga kiritilmaydi. Tashkiliy qo‘mita maqola matnini qisqartirish, qisman tuzatish kiritish, seksiyalarga joylashtirish huquqiga ega.



ISSN 3030-3907

УДК 66.048.54:621.187.11

# ИНТЕНСИФИКАЦИИ ТЕПЛООБМЕНА И ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ СОЛЕОТЛОЖЕНИЯ В ВЫПАРНАХ АППАРАТАХ

**Худойбердиева Назора Шарофовна**

***Доцент Навоийского государственного горно-технологического университета PhD.***

**Исмоилова Зарина Отабек кизи**

***Студент Навоийского государственного горно-технологического Университета гр. 3а-24 КМ.***

**Аннотация.** Результаты проведенных исследований подтверждают значительный рост эффективности теплообмена в выпарных установках с выносной зоной кипения при использовании дисперсных теплоносителей. В частности, внедрение твердой фазы позволило достичь значений коэффициента теплопередачи в диапазоне 2800–3600 Вт/(м²·К), что существенно превосходит показатели аппаратов без зернистого материала (1400–2800 Вт/(м²·К)). Применение таких систем наиболее целесообразно для переработки вязких, высококонцентрированных и склонных к кристаллизации растворов. Интенсивная турбулизация потока, вызванная хаотичным движением частиц по всей длине трубок, не только повышает теплоотдачу, но и обеспечивает эффект самоочистки поверхностей от загрязнений.

**Ключевые слова:** выпаривания, удаление влаги, раствор, концентрация раствора, солеотложения, теплопередачи, интенсивность, твердые частицы, зернистый материал, выпарной аппарат.

**Аннотация.** Олиб борилган тадқиқотлар шуни кўрсатдики, буғлатиш аппаратларида, хусусан, ажратилган қайнаш зонасига эга қурилмаларда дисперс тизимларни, яъни майда қаттиқ заррачаларнинг иссиқлик ташувчи муҳит билан аралашмасини қўллаш иссиқлик узатиш жадаллигини сезиларли даражада оширади. Жумладан, қаттиқ заррачали материал ишлатилган аппарат учун умумий иссиқлик бериш коэффициенти 2800–3600 Вт/(м²·К) га етди, бу донадор материалсиз аппаратдаги 1400–2800 Вт/(м²·К) кўрсаткичидан анча юқоридир. Дисперс тизимлардан фойдаланишнинг самарадорлиги, айниқса, кристалланадиган, юқори концентрацияли ва ёпишқоқ эритмаларни буғлатишда алоҳида аҳамиятга эга. Қаттиқ заррачаларнинг хаотик ҳаракати қувурнинг бутун узунлиги бўйлаб оқимнинг юқори турбулентлигини юзага келтиради. Бу эса нафақат эритма томонидан иссиқлик бериш коэффициентини оширади, балки иссиқлик алмашиниш



ISSN 3030-3907

сиртларининг ифлосланишини ва чўкиндилар ҳосил бўлишини самарали равишда олдини олади.

**Калит сўзлар:** буғлатиш, намликни чиқариб юбориш, эритма, эритма концентрацияси, туз чўкинмалари, иссиқлик ўтказиш, жадаллик, қаттиқ заррачалар, донадор материал, буғлатиш аппарати.

**Abstract.** Research has demonstrated that the use of dispersed systems as heat transfer media in evaporators with a remote boiling zone ensures a significant increase in heat transfer intensity. The overall heat transfer coefficient for the apparatus utilizing solid particles ranged from 2800–3600 W/(m²·K), compared to 1400–2800 W/(m²·K) for the unit without granular material. The efficiency of dispersed systems is particularly pronounced during the evaporation of crystallizing, highly concentrated, and viscous solutions. The chaotic motion of solid particles generates high flow turbulence throughout the entire length of the tube, which not only enhances the heat transfer coefficient on the solution side but also prevents surface fouling.

**Keywords:** evaporation, moisture removal, solution, solution concentration, scale formation, heat transfer, intensity, solid particles, granular material, evaporator, sediment deposition.

**ВВЕДЕНИЕ**

Выпариванием называется технологический процесс, целью которого является удаление основной массы растворителя из раствора для получения продукта с заданной, более высокой концентрацией. Оптимизация процесса выпаривания предполагает обеспечение требуемой производительности по сгущенному продукту, достижение заданной концентрации без потерь сухого вещества, а также минимизацию удельного расхода теплоносителя.

Реализация процесса выпаривания осуществляется в однокорпусных или многокорпусных выпарных аппаратах. Использование многокорпусных систем позволяет существенно сократить удельный расход тепловой энергии, благодаря эффективному использованию вторичного пара.

К конструкции современных выпарных аппаратов предъявляется ряд ключевых требований, обеспечивающих эффективность и надежность их эксплуатации:

•Конструктивная простота и технологичность: Аппараты должны отличаться компактностью, высокой эксплуатационной надежностью, а также быть простыми в изготовлении, монтаже и последующем ремонте.

•Стандартизация: Максимальная унификация и стандартизация узлов и деталей для упрощения обслуживания, замены и снижения затрат на производство.



ISSN 3030-3907

•Обеспечение технологического режима и качества продукта: Способность точно поддерживать заданные технологические параметры (температура, давление, время пребывания раствора в аппарате), гарантируя получение продукта или полупродукта необходимого качества и требуемой концентрации.

Важна также устойчивость в работе и возможность длительной непрерывной эксплуатации между циклами очистки с минимальным образованием отложений на теплообменных поверхностях, а также удобство обслуживания, регулирования и контроля за процессом.

•Энергоэффективность и экономичность: Высокая интенсивность теплопередачи, малый вес конструкции и невысокая удельная стоимость одного квадратного метра поверхности нагрева, что влияет на общую экономическую эффективность установки.

В современной промышленной практике наиболее широкое распространение получили выпарные аппараты вертикального типа. Популярность данных конструкций обусловлена рядом их существенных преимуществ, среди которых следует выделить: высокую компактность, реализацию эффективной естественной циркуляции (за счет интеграции циркуляционной трубы), а также достижение значительной кратности циркуляции теплоносителя. Кроме того, аппараты вертикального исполнения характеризуются минимальной занимаемой площадью, развитым паровым объемом и высокой ремонтопригодностью, что существенно упрощает их эксплуатацию и сервисное обслуживание.

С точки зрения термодинамической оптимизации процесса, в случаях, когда температура исходного раствора существенно ниже температуры его кипения, представляется целесообразным осуществление предварительного подогрева в автономном теплообменном аппарате. Данная мера позволяет выпарному аппарату функционировать исключительно в режиме испарения, исключая выполнение функции подогревателя, которое неизбежно ведет к снижению интегрального коэффициента теплопередачи. Также установлена прямая корреляция между параметрами сырья и энергозатратами: повышение начальной концентрации исходного раствора способствует закономерному снижению удельного расхода теплоты на процесс упаривания.

Комплексная оптимизация данных процессов напрямую способствует решению стратегических задач современной промышленности. К ним относятся: форсированная модернизация и технологическое перевооружение предприятий, планомерное снижение производственных издержек и



ISSN 3030-3907

себестоимости готовой продукции. Системный подход к совершенствованию выпарных установок позволяет существенно сократить энергоемкость производств и внедрить эффективные ресурсосберегающие технологии, что в конечном итоге обеспечивает устойчивый рост производительности и общей экономической эффективности предприятий.

К основным методам интенсификации работы выпарных установок относятся:

Оптимизация гидродинамических режимов: Создание наиболее эффективных условий для движения раствора и пара внутри аппарата.

Введение внутренних элементов: Установка различных перегородок, турбулизаторов или вставок в кипящую трубу для увеличения турбулентности и улучшения перемешивания.

Внедрение газовых или паровых потоков: Вдув пара или воздуха непосредственно в раствор для снижения его вязкости, интенсификации кипения и улучшения массообменных процессов.

Применение профилированных теплообменных поверхностей: Использование труб с особой геометрией (например, рифленых или спиральных) для увеличения площади теплообмена и турбулизации потока.

Выбор конкретного метода интенсификации определяется комплексом факторов, включая:

Экономические аспекты: Величина допустимых энергетических затрат на реализацию метода и его влияние на общую стоимость эксплуатации.

Технологичность и надежность: Простота изготовления, монтажа, удобство и надежность в эксплуатации, а также ремонтопригодность.

Ограничения применения: Свойства обрабатываемого раствора (вязкость, склонность к кристаллизации, коррозионная активность), особенности режима теплообмена и конструктивные характеристики самого выпарного аппарата.

Методы повышения эффективности выпарных установок можно условно разделить на две взаимосвязанные группы:

а) интенсификация гидродинамических процессов: Направлены на оптимизацию движения жидкости и пара, улучшение перемешивания, снижение образования отложений и увеличение скорости массообмена в объеме аппарата.

б) интенсификация теплообмена в греющих камерах: Ориентированы на повышение эффективности передачи тепла от греющего агента к раствору, например, за счет увеличения поверхности теплообмена или улучшения теплофизических свойств теплоносителей.



ISSN 3030-3907

Существующие недостатки выпарной установки (на примере обезвоживания расплава роданида аммония и тиомочевины) включают:

1. Избыточные габариты и время пребывания: Наблюдается непропорционально большая площадь теплообмена и, как следствие, избыточный объем выпарных аппаратов. Это приводит к увеличению времени пребывания неконцентрированного раствора в нагреваемой зоне, что в процессе выпаривания расплава солей роданида аммония и тиомочевины в двухкорпусной установке вызывает частичное разложение продукта.

2. Низкая эффективность сушки: Эффективность сушки расплава горячим азотом в пленочном аппарате является недостаточной из-за ограниченного контакта между расплавом и азотом.

Предлагаемое решение для устранения указанных недостатков:

Предлагается модернизация установки путем замены существующих аппаратов на более компактные. В данном аппарате предполагается осуществлять сушку материала в центробежно- закрученном псевдоожиженном слое кристаллов солей. Вихревые аппараты отличаются высокой степенью однородности взвешенного слоя и обеспечивают возможность поддержания значительных скоростей обтекания частиц газовым потоком.

Проведение процесса сушки во взвешенным состояние обезвоживаемого расплава приводить к росту поверхности контакта между высушиваемым материалом и сушильным агентом. Применение такого аппарата позволяет полное удаление воды из соли.

Наиболее эффективным способом интенсификации теплообмена и предотвращения солеотложения является создание циркуляции псевдожиженного слоя твердых частиц или различных насадок по циркуляционному контуру аппарата.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

С целью практического подтверждения, эффективности применения метода псевдоожижения твердых частиц в выпарном аппарате с кипением в трубах была изготовлена экспериментальная установка.

Конструктивно установка представляет собой замкнутый контур с естественной циркуляцией, ключевыми узлами которого являются вертикальный однотрубный кипятильник, сепаратор и циркуляционная труба. Вспомогательное оборудование включает поверхностный конденсатор вторичного пара и систему контрольно-измерительных



ISSN 3030-3907

приборов. Для дренажа системы и отбора проб в нижней точке циркуляционного контура предусмотрен запорный кран.

В качестве рабочих сред использовались дистиллированная вода, а также водные растворы хлорида натрия с массовой концентрацией 10% и 20%. Мониторинг концентрации солей осуществлялся путем измерения плотности растворов с помощью денситометров (погрешность 0,001 г/см³). Экспериментальный теплообменный элемент выполнен из меди и имеет геометрические размеры 28×2×2050 мм (внутренняя поверхность теплообмена - 0,16 м²).

Технологический процесс протекает следующим образом: при восходящем движении в теплообменной трубке раствор нагревается до температуры насыщения, что инициирует процесс кипения. Образующаяся парожидкостная смесь поступает в сепаратор для фазового разделения. Благодаря значительному объему парового пространства сепаратора достигается высокая степень очистки вторичного пара от капельного уноса. Очищенный пар направляется в конденсатор, где переходит в жидкую фазу под воздействием охлаждающей воды.

Интенсивность испарения (количество выпаренной влаги) фиксировалась объемным методом путем сбора конденсата в мерную емкость.

Исследования гидродинамики и теплообмена в трубчатых кипятильниках проводились при атмосферном давлении в сепараторе. Опыты с псевдоожиженным слоем твердых частиц предварялись сериями экспериментов по кипению чистой воды (без зернистого материала) для установления базовых параметров.

Установка работала на кольцевом режиме по исходному раствору с возвратом конденсата вторичного пара, самотёком в циркуляционный контур, для сохранения постоянства концентрации раствора.

В ходе исследований варьировались следующие параметры:

•Тепловая нагрузка: Плотность теплового потока (мощность, подводимая к теплообменной поверхности) изменялась в диапазоне 20–70 кВт/м², что соответствует рабочим условиям типовых промышленных выпарных аппаратов.

В экспериментах в качестве модельных материалов твердой фазы были использованы стальные шарики диаметром 2, 4 и 5мм, стеклянные шарики диаметром 1,6, 2,54 и 4,84 мм. В нижней части теплообменной трубки устанавливались сменные распределительные решетки, площадь живого сечения которых изменялась в пределах 3 - 5%.



ISSN 3030-3907

В процессе экспериментов измерялись следующие параметры:

- давление греющего и вторичного пара - образцовым манометром со шкалой 0 ... 4 кгс/см$^2$ и мановакуумметром со шкалой - I ...+I кгс/см$^2$;
- расход раствора в циркуляционном контуре (скорость циркуляции) - тарированной на специальном стенде диафрагмой ДК 6 - 50, присоединенной к U - образному дифманометру; результаты измерений скорости циркуляции проверялись по тепловому балансу;
- расход греющего пара - стандартной диафрагмой ДК 6 - 50 в комплекте с передающим преобразователем 13ДД11 и вторичным прибором ПВ4.2Э; с целью проверки показаний диафрагмы были проведены тарировочные опыты, при которых конденсат греющего пара измеряли объемным способом;
- температуру греющего пара, конденсата греющего и вторичного пара в мерном баке, исходного раствора (конденсата вторичного пара), температуру кипения раствора, температуру раствора на входе в греющую камеру и на выходе из нее - лабораторными термометрами марки ТЛ - 4Б с пределами измерений 50 … 100°С и 100 ... 150°С с ценой деления 0,1°С. Измерение температуры раствора на входе в греющую камеру и на выходе из нее, дублировались хромель-копелевыми термопарами. К показаниям термометров были прибавлены соответствующие поправки, указанные на паспорте термометра;

**РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ**

При обработке экспериментальных данных со слоем твердых частиц в качестве определяющих параметров взяты: средняя температура ожижающей среды, скорость в пространстве между зернами, равная скорости фильтрации U, деленной на среднюю порозность кипящего слоя; определяющий геометрический размер – эквивалентный диаметр канала $D_э$, образованного порами.

1. Эквивалентный диаметр порового канала. Для слоя шаров одинакового диаметра d этот размер может быть найден по формуле:

$$D_э = \frac{2d \cdot \varepsilon}{3(1-\varepsilon)} \qquad (1)$$

2. С учетом формулы (1) уравнение критерия Рейнольдса принимает вид:

$$Re_э = D_э \cdot U \cdot \rho/(\varepsilon \cdot \mu) = 2d \cdot U \cdot \rho/[3(1 - \varepsilon) \cdot \mu] \qquad (2)$$

3. Порозность псевдоожиженного и неподвижного слоя

$$\varepsilon = 1 - (H_0/H)(1 - \varepsilon_0) \qquad (3)$$

$$\varepsilon_0 = 0{,}39+0{,}47 \cdot n^{-1{,}35} \qquad (4)$$



ISSN 3030-3907

4. Критерий Архимеда

$$Ar = d^3 \cdot (\rho_т - \rho) \cdot \rho \cdot g / \mu^2 \quad (5)$$

5. Критерий Лященко $Ly = \rho^2 \cdot U^3 / (\mu \cdot (\rho_т - \rho) \cdot g) = Re_0^3 / Ar$ (6)

6. Число псевдоожижения $K_w = U/U_1$ (7)

где U – рабочая скорость ожижающего агента, м/с;

$U_1$ – скорость начала псевдоожижения, м/с.

7. Фактор формы несферических частиц

$$Ф = 6/(a_0 \cdot d_{ср}) \quad (8)$$

На рис.1 представлена зависимость интенсивности теплоотдачи при кипении воды от удельной тепловой нагрузки при значениях скорости циркуляции $w$ = 0,2 м/с и $w$ = 0,5 м/с, для стальных (рис. 1 а) и стеклянных (рис. 1 б) частиц различного размера. Эксперименты показали, что при $w$ = 0,2 м/с размер частиц как стальных, так и стеклянных частиц практически не влияет на интенсивность теплоотдачи.

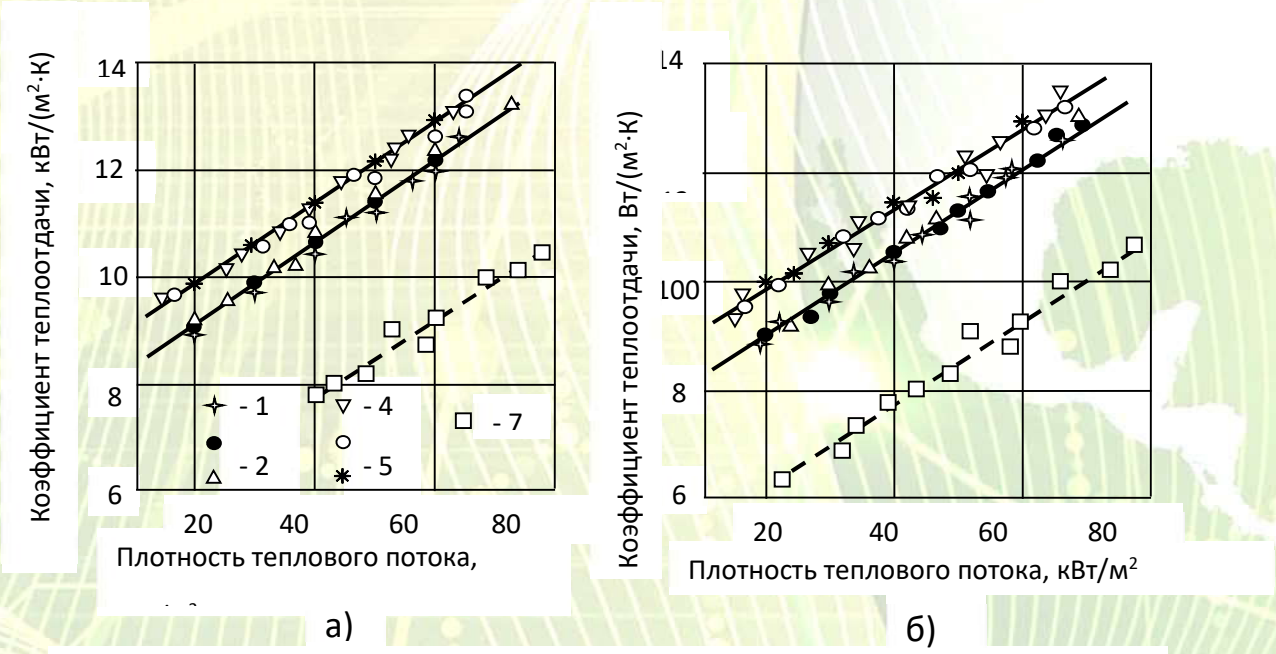



**Рис. 1. Зависимость коэффициента теплоотдачи от плотности теплового потока.**

**а)** стальные частицы диаметром d при скорости циркуляции $w$ = 0,2 м/с: 1 – d = 2 мм; 2 – d = 4 мм; 3 – d = 5 мм; при $w$ = 0,5 м/с: 4 – d = 2 мм; 5 – d = 4 мм; 6 – d = 5 мм; 7 – в трубе без твердых частиц.

**б)** стеклянные частицы при $w$ = 0,2 м/с: 1 – d = 1,6 мм; 2 – d = 2,54 мм; 3 – d = 4,84 мм $w$ = 0,5 м/с: 4 – d = 1,6 мм; 5 – d = 2,54 мм; 6 – d = 4,84 мм.



ISSN 3030-3907

При скорости циркуляции, равной 0,5 м/с, с увеличением диаметра частиц коэффициент теплоотдачи существенно растет. При скорости циркуляции $w$ = 0,2 м/с и плотности теплового потока q > 20000 Вт/м$^2$ коэффициент теплоотдачи практически не зависит от скорости. При таком режиме паросодержание потока высокое и интенсивность переноса тепла определяется плотностью теплового потока. Кроме того при $w$ = 0,2 м/с слой зернистого материала не расширяется до оптимального значения. По этому при развитом пузырьковом кипении воды в трубе при низких значениях скорости потока и высоких паросодержаниях диаметр частиц не оказывает влияние на теплоотдачу, хотя интенсифицирующая роль зернистого материала остается ощутимой. Наоборот, при достаточно больших скоростях циркуляции с увеличением диаметра частиц интенсивность переноса тепла возрастает.

Наиболее оптимальными с точки зрения интенсивности теплообмена являются скорости циркуляции 0,7 – 0,8 м/с для стальных шариков, 0,5 - 0,6 м/с для стеклянных частиц.

На основании наших наблюдений и предпосылок сделан вывод о том, что скорость циркуляции раствора в выпарных аппаратах с кипением раствора в трубах при атмосферном давлении должна составлять 0,5 – 1,0 м/с, а не 2 – 2,5 м/с, как указано в каталоге. Это позволит аппарату работать с наиболее эффективной теплопередачей при кипении раствора в трубах и даст возможность снизить расход энергии на циркуляцию раствора.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты экспериментов показывают, что с увеличением диаметра как стальных, так и стеклянных частиц интенсивность теплопереноса возрастает. Однако, наблюдаемое влияния диаметра частиц на теплоотдачи носит не только прямой, но и косвенный характер, потому что связан с изменением критических скоростей псевдоожижения. Чем меньше диаметр частиц при одинаковых их плотностях, тем уже область существования псевдоожижения.

При работе аппаратов с твердой дисперсной фазой, за счет интенсификации теплопередачи и исключения солеотложения в них, удельная производительность аппарата по выпаренной воде в 1,8–2,1 раза превышала аналогичный показатель действующей установки.

## СПИСОК Л0ИТЕРАТУРЫ

1. Таубман Е.И. Выпаривание. - М.: Химия, 1982. - 328 с.



ISSN 3030-3907

2. Бахронов Х.Ш., Худойбердиева Н.Ш. Высокоэффективные самоочищаемые теплообменники // «Истиклол»: Материалы Респ. науч. - техн. конф. - Москва-Навоий, - 2007. - С. 153.
3. Бахронов Х.Ш. Повышение эффективности выпаривания кристаллизующихся растворов с использованием псевдоожиженного слоя // Современная техника и технология горно-металлургической отрасли и пути их развития: Материалы международной науч. – техн. конф. – Навоий, 2008. - С. 141-144.
4. Псевдоожижение / В.Г. Айнштейн, А.П. Баскаков и др.; под ред. В.Г. Айнштейна. - М.: Химия, 1991. - 440 с.
5. Бахронов Х.Ш. Повышение эффективности выпаривания кристаллизующихся растворов с использованием псевдоожиженного слоя: Дис. … докт. техн. наук. – Ташкент: 2009. - 270 с.
7. Лебедев В.Я.. Сушка сыпучих и пастообразных материалов во взвешенном состоянии. Сообщение 2. // Известия вузов. Серия «Химия и химическая технология». - Иваново, 2006. Т.49. - Вып 1. - С. 122-124.


ISSN 3030-3907