

Торайғыров университетінің хабаршысы
ҒЫЛЫМИ ЖУРНАЛЫ

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
Вестник Торайғыров университета

Торайғыров университетінің ХАБАРШЫСЫ

Энергетикалық сериясы
1997 жылдан бастап шығады



ВЕСТНИК Торайғыров университета

Энергетическая серия
Издается с 1997 года

ISSN 2710-3420

№ 1 (2023)

ПАВЛОДАР

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
Вестник Торайгыров университета

Энергетическая серия

выходит 4 раза в год _____

СВИДЕТЕЛЬСТВО

о постановке на переучет периодического печатного издания,
информационного агентства и сетевого издания

№ 14310-Ж

выдано

Министерство информации и общественного развития
Республики Казахстан

Тематическая направленность

публикация материалов в области электроэнергетики,
электротехнологии, автоматизации, автоматизированных и
информационных систем, электромеханики и теплоэнергетики

Подписной индекс – 76136

<https://10.48081/BNAS6555>

Бас редакторы – главный редактор

Кислов А. П.
к.т.н., профессор

Заместитель главного редактора

Талипов О. М., *доктор PhD*

Ответственный секретарь

Калтаев А.Г., *доктор PhD*

Редакция алқасы – Редакционная коллегия

Клецель М. Я.,	<i>д.т.н., профессор</i>
Новожилов А. Н.,	<i>д.т.н., профессор</i>
Никитин К. И.,	<i>д.т.н., профессор (Россия)</i>
Никифоров А. С.,	<i>д.т.н., профессор</i>
Алиферов А.И.,	<i>д.т.н., профессор (Россия)</i>
Кошеков К.Т.,	<i>д.т.н., профессор</i>
Приходько Е.В.,	<i>к.т.н., профессор</i>
Оспанова Н. Н.,	<i>к.п.н., доцент</i>
Нефтисов А. В.,	<i>доктор PhD</i>
Омарова А.Р.,	<i>технический редактор</i>

За достоверность материалов и рекламы ответственность несут авторы и рекламодатели

Редакция оставляет за собой право на отклонение материалов

При использовании материалов журнала ссылка на «Вестник Торайгыров университета» обязательна

© Торайгыров университет

***А. А. Генбач¹, Д. Ю. Бондарцев², Н. А. Генбач³**

^{1,2,3}Алматинский Университет энергетики и связи имени

Г. Даукеева, Республика Казахстан г. Алматы

e-mail:

УСТАНОВКИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ВДУВА ВОЗДУХА НА ИНТЕНСИВНОСТЬ ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ В ЭНЕРГООБОРУДОВАНИИ

Разработаны, изготовлены и исследованы процессы на установках с капиллярно-пористыми структурами, вдувом воздуха и воздушно-водоиспарительным охлаждением. Установки позволяют исследовать процессы теплопередачи, аэродинамики и генерации пара и воздушно-механической пены. Разработаны установки с нагревателем большой мощности и работающие под высоким давлением. В качестве капиллярно-пористых структур использовались различные сетчатые материалы в виде изотропных и анизотропных вариантов, причем набор сеток мог осуществляться с ростом гидравлического размера как по направлению, так и против направления теплового потока. В качестве капиллярно-пористых материалов также изучались наноструктурированные покрытия, выполненные путем распыления порошка из минеральных сред сверхзвуковым высокотемпературным факелом огнеструйной горелки ракетного типа. Вдув воздуха сквозь поры и капилляры структуры и покрытий позволяет на порядок интенсифицировать процессы теплообмена, а также существенно форсировать отвод тепловых нагрузок. Наличие капелек воды в многофазном турбулентном пограничном слое расширяет рабочую зону теплопередачи и отодвигает критические тепловые потоки. За счет аналогии процессов гидродинамики, вязкой жидкости, теплообмена и массообмена обобщаются результаты исследования кипения, конденсации, генерации пены чистым и запыленным воздухом. Установки большой мощности позволили исследовать критические тепловые потоки на порядок больше, чем для кипения в большом объеме. Установки, работающие под высоким давлением, позволяют

изучать внутренние (термогидравлические) характеристики кипения и через них рассчитывать тепловые потоки.

Ключевые слова: экспериментальные установки, капиллярно-пористые структуры, теплообмен, массообмен, энергооборудование.

Введение

Вдув воздушного потока в канал разомкнутой экспериментальной испарительной установки предназначены для исследования эффективности эвакуации пара, генерируемого в капиллярно-пористой структуре. Набегающий поток влияет на динамику растущих и гибнущих паровых пузырей [1], а значит и на интенсивность и форсировку [2] процесса теплопередачи.

Вдув воздуха, является одним из внешних методов управления теплообменом, наряду с внутренними способами воздействия на кипящий многофазный пульсирующий пограничный слой [3]. Такой прием использовался в различных устройствах энергоустановок электростанций [4–5].

Более того, за счет комбинированного действия в системе охлаждения капиллярных и массовых сил, возможно управлять внутренними (термодинамическими) характеристиками кипения в структурах [1–2].

Экспериментальными исследования пористой системы охлаждения предназначены для применения ее в энергетических установках [6–10], так и для разработки моделирующих и аналоговых методов изучения быстротекущих процессов на примере эллиптических систем [3]. Наряду с созданием высокофорсированных систем охлаждения [1–3, 6–8], разрабатываются пористые системы совместного теплообмена, пыле- и газоочистки в пенных многофазных потоках [4, 5].

Материалы и методы

Для интенсификации теплообмена и расширения процесса отводимых тепловых потоков использовался, вдув воздуха с помощью вентилятора 5 в парогенерирующий канал (рис. 1).

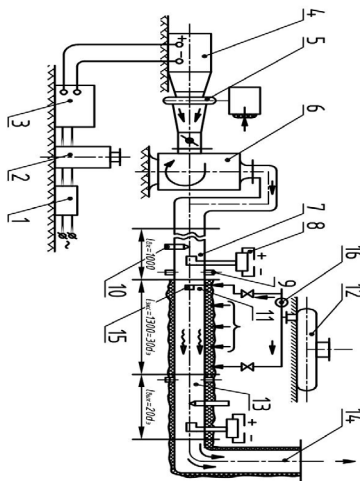


Рисунок 1 – Экспериментальная установка по изучению влияния вдува воздуха на интенсивность теплопередачи: 1 – стабилизатор напряжения; 2 – автотрансформатор; 3 – выпрямитель; 4 – двигатель ($N = 4$ кВт); 5 – вентилятор ($Q = 500$ м³/ч; $H = 300$ мм Н₂O); 6 – ресивер; 7 – входной участок; 8 – трубка Прандтля; 9 – отбор статического давления; 10 – термометр; 11 – рабочий участок; 12 – бак постоянного уровня; 13 – выходной участок; 14 – отводящий патрубок; 15 – распылитель.

На рабочем участке 11 также устанавливались форсунки 15, т.е. капиллярно-пористая система сочеталась с воздушно-водоиспарительной. Распыляемые форсункой капли воды дополнительно смачивали структуру, а поток воздуха способствовал более интенсивному отводу пара из рабочего участка 11 и уделению его через отводящий патрубок 14 в атмосферу.

На рис. 2 показан стенд по исследованию вдува воздуха и капиллярно-пористая и воздушно-водоиспарительная система охлаждения.

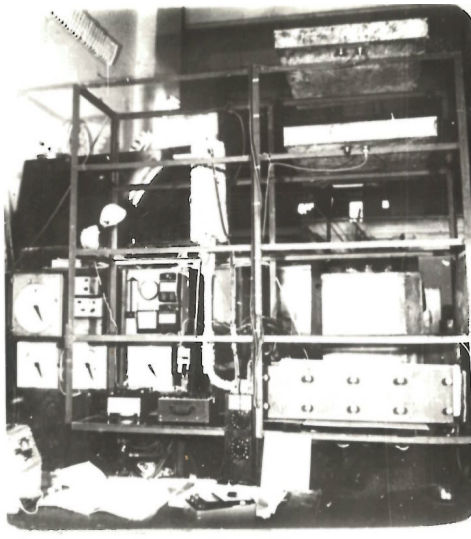


Рисунок –2 Фотография экспериментального стенда по исследованию вдува воздуха на интенсивность теплопередачи в разомкнутой капиллярно-пористой системы охлаждения

На рис.3 изображено устройство охлаждающего элемента. Корпус 1, крышка 2 и вставка 4 выполнены из нержавеющей стали марки 18Н10Т с толщиной стенки 2х10-2 м. Вставка 5 шириной 15х10-3 м служит для образования канала, по которому пар направляется к конденсатору. Охлаждающая жидкость поступает к пористой структуре 6 по медным трубчатым артериям 3. Структура приваривается к стенке точечной сваркой, а перфорированная упругая бронзовая пластина 10 крепится винтами 12. Избыток жидкости улавливается микро-артериями 11 и вновь направляется к структуре, а козырек микро-артерии препятствует интенсивному выбросу жидкости. Предусмотрены датчики 1, 2 для измерения давления потока.

Обогрев стенки производится основным электрическим нагревателем 7. Охранный нагреватель 8 служит для компенсации потерь тепла наружу и быстрого выхода установки на режим.

Он смонтирован в толще изоляции 9. Между основным и охранным нагревателями устанавливается дифференциалы термopара, по которой поддерживается нулевой градиент температуры, что обеспечивает создание адиабатических условий нагрева.

Основной нагреватель выполняется из нихромовой фольги толщиной 0,05; 0,1; 0,3; 0,5; 0,7х10-3 м или нержавеющей пластины – 1 и 2х10-3 м.

Длина нагревателя составляет 0,05...0,3 м. Электрический ток подводится по медным электродам диаметром 30×10^{-3} м. Слюда толщиной $0,05 \times 10^{-3}$ м выполняет роль электроизоляции между стенкой и нихромом.

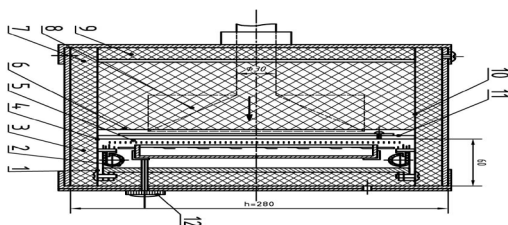


Рисунок 3 – Устройство пористого охлаждения (элемента) (поперечный разрез):

- 1 – корпус; 2 – крышка; 3 – трубчатая артерия; 4 – вставка; 5 – пористая структура; 6 – электроизоляция (слюда); 7 – основной нагреватель; 8 – охранный нагреватель; 9 – теплоизоляция; 10 – перфорированная прижимная пластина; 11 – микро-артерия

Разъёмная конструкция установки обеспечивает изучение влияния вида структуры на интенсивность теплообмена. Структуры набираются из гладких тканых латунных и нержавеющей сеток простого и саржевого переплетений. Структуры формируются из одного, двух и трех слоев сеток: однослойный – 0,14; 0,28; 0,4; 0,55; двухслойный – $2 \times 0,14$; $2 \times 0,4$; $2 \times 0,55$; 2×1 ; $0,4 \times 0,55$ и трехслойный – $3 \times 0,14$; $3 \times 0,28$; $0,08 \times 0,14 \times 0,14$; $0,08 \times 0,28 \times 0,28$; $0,08 \times 0,14 \times 0,4$; $0,14 \times 0,28 \times 0,4$; $3 \times 0,4$. Толщина пористых структур находится в пределах $(0,18...3) \times 10^{-3}$ м, а их число достигает девяти при определении величины $\Delta T_{н.з.}$.

Кроме электрического нагревателя, применяется лучистый нагрев, а промышленные испытания проводятся с применением газового потока.

Геометрические характеристики применяемых сеток даны в таблице 1.

Таблица 1 – Геометрические характеристики сеток

№	Размер ячейки на просвет, $\times 10^{-6}$ мм	Диаметр проволоки, $\times 10^{-3}$ м	Толщина, $\times 10^{-3}$ м	Материал	ГОСТ или ТУ
1	0,08x0,08	0,055	0,1	Л80	6613-73
2	0,14x0,14	0,09	0,18	Л80	6613-73
3	0,28x0,28	0,14	0,25	Л80	6613-73

4	0,08x0,08	0,055	0,1	12x18H9T	ЧМТУ-4-7-66
5	0,14x0,14	0,09	0,18	12x18H9T	ЧМТУ-4-7-66
6	0,4x0,4	0,25	0,5	12x18H10T	12184-66
7	0,55x0,55	0,2	0,52	12x18H10T	-

Поверхность охлаждения выполняется из нержавеющей стали марок 18H10T и 12x18H9T, латуни Л80, меди М2, никеля, алунда и стекла. Толщина стенки принимает значения: 0,05; 0,1; 0,3; 0,5; 0,7; 1 и 2x10-3 м.

Выброс капель фотографируется для структур вида: 0,14x0,4; 0,4; 0,4x0,14x0,08; 0,55x0,4x0,14; 1x0,55x0,4.

Результаты и обсуждение

Кризис кипения изучается для структур вида: 0,14; 0,28; 0,4; 0,55; 1x1; 3x1; 0,08x0,55; 0,14x0,55; 2x0,14; 2x0,55; 0,08x0,14x0,14; 0,08x14x0,28; 0,08x0,14x0,4; 3x0,14; 2x0,28; 0,08x0,14x1; 0,4x0,14x0,08; фильтроткань. Величины $q_{кр}$ отводятся до значения 2x106 Вт/м² при перегревах стенки до 80К. Опыты проводятся вплоть до разрушения стенки и структуры.

В волнистом интенсификаторе с высотой волны 0,05 м и шириной 0,1 м применяются структуры вида 0,08x0,14x1; 0,14x0,14x0,14; 0,4x0,14x0,8; 1x1x1. Радиус волны составляет 0,5 дэ.

Обогрев рабочего участка (рис. 4) осуществляется электрическим нагревателем состоящим из элементов 4, 5, 6. Для компенсации потерь тепла использовался охранный нагреватель 7. Капиллярно-пористое тело 1 прижималось к охлаждаемой стенке 2 перфорированной пластиной.

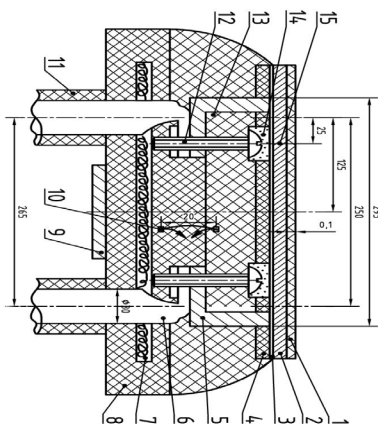


Рисунок 4 – Схема обогрева рабочего участка:

1 – пористое тело; 2 – охлаждаемая стенка; 3 – электроизолирующая

слюда; 4 – нихромовая фольга; 5 – медные шины; 6 – медные электроды;
 7 – охранный нагреватель; 8 – теплоизоляция;
 9 – прижим; 10 – дифференциальная термопара; 11 – теплоизоляция
 электродов; 12 – крепежный болт; 13 – асбоцементная плита;
 14 – асбестовая пушонка; 15 – термопары.

Для создания высоких удельных тепловых потоков использовался разрезной нихромовый электрический нагреватель малой толщины (0,05х10-3 м) (рис. 5)



Рисунок 5 – Разрезной нихромовый электрический нагреватель большой мощности

($\delta = 0,05 \times 10^{-3}$ м).

Для исследования влияния высоких давлений в плоском капиллярно-пористом теплообменнике на крышке 4 устанавливались ребра жесткости 5 (рис. 6).

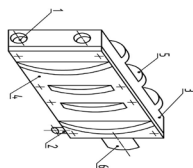


Рисунок 6 – Плоский теплообменник с капиллярно-пористой структурой, работающей под высоким давлением: 1 – окно для подвода охладителя; 2 – патрубок отвода охладителя (слив избыточной жидкости); 3 – корпус; 4 – крышка; 5 – ребра жесткости; 6 – патрубок отвода пара

Также изготавливался теплообменник с искривлённой теплообменной поверхностью нагрева 4 (рис. 7), позволяющий исследовать степень прижатия капиллярно-пористой структуры 5. Зажимы 12, скрепляющие корпус 9 и крышку 10, позволяли испытывать систему охлаждения под давлением.

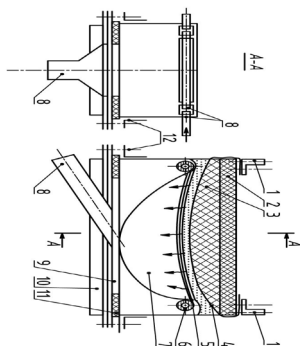


Рисунок 7 – Экспериментальная установка с капиллярно-пористой структурой, охватывающей искривлённую теплообменную поверхность и работающая под высоким давлением: 1 – электрод; 2 – асбестовая плита; 3 – асбестовая пушонка; 4 – нихром; 5 – капиллярно-пористая структура; 6 – питающая артерия; 7 – паровой канал; 8 – патрубок отвода пара; 9 – корпус; 10 – крышка; 11 – прокладка; 12 – зажим

Экспериментальная установка со вдувом воздуха и воздушно-водоиспарительным охлаждением (см. рис. 1) могла быть усовершенствована элементом (рис. 8), позволяющим генерировать воздушно-механическую пену.

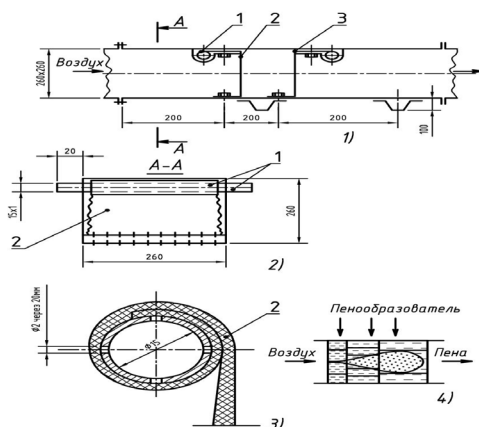


Рисунок 8 – Экспериментальная установка для генерации пенного потока в капиллярно-пористой структуре (1): 1 – питающая артерия; 2, 3 – генерирующая и гасящая структуры; (2) – элемент подвода пенообразователя; (3) установка структуры 2; (4) – механизм выдувания пены из структуры 2

Отличительной чертой элемента являлась безфорсуночная подача пенообразующего раствора с помощью питающей артерии 1, причем установка содержала пеногенерирующую 2 и пеногасящую 3 структуры. На рис. 7 также показаны способ подвода пенообразователя, установка структуры и механизм выдувания пенного потока.

Выводы

Таким образом, созданы экспериментальные установки и проведены исследования вдува воздуха в паровой канал, имеющий капиллярно-пористое покрытие. Наличие распылителя позволило сочетать капиллярно-пористую и воздушно-водоиспарительную системы охлаждения. Разработаны нихромовый разрезной электронагреватель большой мощности. Установки позволяли проводить исследования теплообмена для высоких давлений в системе охлаждения (плоский ребристый теплообменник и установка с искривлённой теплообменной поверхностью). Создана установка для генерации и гашения воздушно-механической пены.

REFERENCES

- 1 **Genbach, A. A., Bondartsev, D. Yu., Beloev, H. I., Genbach, N. A.** Boiling crisis in porous structures. // Energy; – 2022. – 259. – 125076. – <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.125076>
- 2 **Genbach, A. A., Bondartsev, D. Yu., Iliev, I. K., Georgiev, A. G.** Scientific method of creation of ecologically clean capillary-porous systems of cooling of power equipment elements of power plants on the example of gas turbines. // Energy. 2020. – 199. – 117458. – <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117458>
- 3 **Genbach, A. A., Bondartsev, D. Yu., Beloev, H. I.** Comparison of Cooling Systems in Power Plant Units.// Energies. – 2021. – 14 – 6365. – <https://doi.org/10.3390/en14196365>.
- 4 **Polyaev, V. M., Genbach, A. A.** Control of heat transfer in a porous cooling system // Second world conference of experimental heat transfer, fluid mechanics and thermodynamics. – Dubrovnik, Yugoslavia 1991. 23 – 28 June. – P. 639–644.
- 5 **Polyaev, V. M., et at.** Methods of monitoring energy processes // Experimental thermal and fluid science. International of thermodynamics, experimental heat transfer, and fluid mechanics. Avenue of the Americas. – New York, 1995. 10 April. – P. 273–286.
- 6 **Seong, Won Moon, et at.** A novel coolant cooling method for enhancing the performance of the gas turbine combined cycle. // Energy. Vol. 160 – 2018. – P. 625–634. – <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.07.035>
- 7 **Wei, Wang, et at.** Cooling performance analysis of steam cooled gas turbine nozzle guide vane // International Journal of Heat and Mass Transfer. – Vol. 62 – 2013. – P. 668–679. – <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2013.02.080>
- 8 **Uwe, Schulz, et at.** Some recent trends in research and technology of advanced thermal barrier coatings. //Aerospace Science and Technology: – Vol. 7. – Iss. 1. – 2003. – P. 73–80. [https://doi.org/10.1016/S1270-9638\(02\)00003-2](https://doi.org/10.1016/S1270-9638(02)00003-2)
- 9 **Zhang, J. X., et at.** Thermomechanical fatigue mechanism in a modern single crystal nickel base superalloy TMS-82. Acta Materialia: Vol. 56, Iss. 13, 2008. – P. 2975–2987. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2008.02.035>
- 10 **David, R., et at.** Thermal barrier coating materials. // Materials Today. –Vol. 8. – Iss. 6, 2005. – P. 22–29. – [https://doi.org/10.1016/S1369-7021\(05\)70934-2](https://doi.org/10.1016/S1369-7021(05)70934-2).

Материал поступил в редакцию 13.03.23.

**A. A. Genbach¹, D. Yu. Bondartsev², N. A. Genbach³*

^{1,2,3}Almaty University of Power Engineering and Telecommunications
named after G. Daukeev, Republic of Kazakhstan, Almaty

Material received on 13.03.23

INSTALLATIONS FOR AIR INJECTION STUDY IN THE HEAT TRANSFER INTENSITY IN POWER EQUIPMENT

Processes on installations with capillary porous structures, air injection and air-water evaporation cooling have been developed, elaborated, and investigated. The installations allow us to study the processes of heat transfer, aerodynamics, steam and air-mechanical foam generation. Installations with a high-power heater operating under high pressure have been developed. Various mesh materials in the form of isotropic and anisotropic versions were used as capillary porous structures, and the set of mesh layers could be carried out with an increase in hydraulic size both in the direction and against the direction of the heat flow. Nano-structured coatings made by spraying powder from mineral medium with a supersonic high-temperature flame of a rocket-type flame-jet burner were also studied as capillary porous materials. Air injection through the pores and capillaries of the structure and coatings makes it possible to substantially intensify the heat exchange processes, as well as significantly accelerate the removal of thermal loads. The water droplets presence in a multiphase turbulent boundary layer expands the heat transfer coverage area and pushes away critical heat flows. Based on the analogy of hydrodynamics processes, viscous liquid, heat transfer and mass transfer, the results of the study of boiling, condensation, and foam generation by clean and dusty air are summarized. High-power installations made it possible to study critical heat flows substantially more than for boiling in a large volume. Installations operating under high pressure make it possible to study the internal (thermohydraulic) characteristics of boiling and to calculate heat flows based on these characteristics.

Key words: experimental installations, capillary-porous structures, heat exchange, mass transfer, energy equipment

*А. А. Генбач¹, Д. Ю. Бондарцев², Н. А. Генбач³

^{1,2,3}Ғұмарбек Даукеев атындағы Алматы Энергетика және Байланыс Университеті, Қазақстан Республикасы, Алматы қ.
Материал баспаға 13.03.23 түсті.

**ЭНЕРГИЯ ЖАБДЫҚТАРЫНДА ЖЫЛУ БЕРУДІҢ
ҚАРҚЫНДЫЛЫҒЫНА АУА ҮРЛЕУДІ ЗЕРТТЕУГЕ АРНАЛҒАН
ҚОНДЫРҒЫЛАР**

Капиллярлы-кеуекті құрылымдары, ауа үрлегіші және ауасу буландыру салқындатқышы бар қондырғыларында процестер әзірленді, дайындалды және зерттелді. Қондырғылар бу мен ауа-механикалық көбіктің жылу беру, аэродинамика және генерация процестерін зерттеуге мүмкіндік береді. Қуаттылығы жоғары қыздырғышы бар және жоғары қысыммен жұмыс істейтін қондырғылар әзірленді. Капиллярлы-кеуекті құрылымдар ретінде изотроптық және анизотроптық нұсқалар түрінде әртүрлі торлы материалдар пайдаланылды, бұл ретте торлар жиынтығы жылу ағынының бағыты бойынша да, бағытына қарсы да гидравликалық өлшемнің өсуімен жүзеге асырылуы мүмкін болды. Капиллярлы-кеуекті материалдар ретінде сондай-ақ зымыран типті от арынды жанарғысының дыбыстан жоғары температуралы алауымен минералды ортадан ұнтақты шашу жолымен орындалған нано-құрылымдалған жабындар зерттелді. Құрылым мен жабындардың кеуектері мен капиллярлары арқылы ауаны үрлеу жылумен алмасу процестерін бірішама қарқындатуға, сондай-ақ жылу жүктемелерінің бөлінуін едәуір үдетуге мүмкіндік береді. Көп фазалы турбулентті шекаралық қабатта су тамшыларының болуы жылу берудің жұмыс аймағын кеңейтеді және сыни жылу ағындарын жылжытады. Гидродинамика, тұтқыр сұйықтық, жылу алмасу және масса алмасу процестерінің ұқсастығы есебінен қайнау, конденсацияны, көбікті таза және шаңды ауамен генерациялауды зерттеу нәтижелері қорытылады. Қуаттылығы жоғары қондырғылар үлкен көлемде қайнауға қарағанда сыни жылу ағындарын ретке келтіруге мүмкіндік берді. Жоғары қысыммен жұмыс істейтін қондырғылар қайнаудың ішкі (термогидравликалық) сипаттамаларын зерттеуге және олар арқылы жылу ағынын есептеуге мүмкіндік береді.

Кілтті сөздер: тәжірибелік қондырғылар, капиллярлы-кеуекті құрылымдар, жылу беру, масса алмасу, энергетикалық жабыдықтар.

Теруге 13.03.2023 ж. жіберілді. Басуға 31.03.2023 ж. қол қойылды.

Электронды баспа

3,44 Mb RAM

Шартты баспа табағы 23.59. Таралымы 300 дана. Бағасы келісім бойынша.

Компьютерде беттеген: А. К. Мыржикова

Корректор: А. Р. Омарова

Тапсырыс № 4039

Сдано в набор 13.03.2023 г. Подписано в печать 31.03.2023 г.

Электронное издание

3,44 Mb RAM

Усл. печ. л. 23.59. Тираж 300 экз. Цена договорная.

Компьютерная верстка: А. К. Мыржикова

Корректор: А. Р. Омарова, Д. А. Кожас

Заказ № 4039

«Toraighyrov University» баспасынан басылып шығарылған

Торайғыров университеті

140008, Павлодар қ., Ломов к., 64, 137 каб.

«Toraighyrov University» баспасы

Торайғыров университеті

140008, Павлодар қ., Ломов к., 64, 137 каб.

67-36-69

E-mail: kereku@tou.edu.kz

www.vestnik-energy.tou.edu.kz