

A. A. Genbach¹, D. Yu. Bondartsev^{1,2}¹AUPET, Almaty, Kaszakhstan,²JS «Trest Sredazenergomontazh», Almaty, Kaszakhstan.

E-mail: d.bondartsev@saem.kz

EXPERIMENTAL METHOD OF STUDYING THE LIMIT STATE OF THE HEAT EXCHANGE SURFACE COVERED BY A CAPILLARY-POROUS MEDIUM

Abstract. Capillary-porous systems have high intensity, high heat transfer ability, reliability, compactness. The results of calculations and experiments showed that the maximum thickness of the particles that break off under the action of compression forces for coatings from granite is $(0,25\div 0,3)\cdot 10^{-2}$ m. Sections of compression curves that determine the separation of particles with dimensions of more than $0,3\cdot 10^{-2}$ m for large heat fluxes and short feed times, are screened by the melting curve, and in the case of small heat fluxes and time intervals, the expansion curve. The research is aimed at creating porous coatings in cooling systems from well – and poorly conductive materials.

Keywords: heat transfer crisis; capillary-porous structure; heat and power installations, cooling systems.

УДК 536.248.2

А. А. Генбач¹, Д. Ю. Бондарцев^{1,2}¹АУЭС, Алматы, Казахстан,²АО «Трест Средазэнергомонтаж», Алматы, Казахстан

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ ПРЕДЕЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ ТЕПЛООБМЕННОЙ ПОВЕРХНОСТИ, ПОКРЫТОЙ КАПИЛЛЯРНО-ПОРИСТОЙ СРЕДОЙ

Аннотация. Капиллярно-пористые системы обладают высокой интенсивностью, большой теплопередающей способностью, надежностью, компактностью. Результаты расчетов и эксперимента показали, что максимальная толщина частиц, отрывающихся под действием сил сжатия для покрытий из гранита составляет $(0,25\div 0,3)\cdot 10^{-2}$ м. Участки кривых сжатия, определяющие отрыв частиц с размерами более $0,3\cdot 10^{-2}$ м для больших тепловых потоков и малого времени подачи, экранируются кривой плавления, а в случае малых тепловых потоков и интервалов времени – кривой растяжения. Исследования направлены на создание пористых покрытий в системах охлаждения из хорошо – и плохо проводных материалов.

Ключевые слова: кризис теплопередачи; капиллярно-пористая структура; тепловые энергоустановки, системы охлаждения.

Введение. Применение капиллярно-пористых материалов в технике привлекало многих исследователей и изобретателей создавать на их основе различные устройства. Повышалась интенсивность теплоотводящих систем и форсировка протекающих в них процессов [1-3]. Использование пористых материалов, помимо систем охлаждения, позволяло создавать агрегаты, в которых решались проблемы взрывобезопасности, охраны труда и долговечности [4, 6]. Этому способствовала возможность управлять процессами парообразования за счет избытка жидкости в порах и капиллярных структурах, создаваемого совместными действиями капиллярных и мас-совых сил [7-9].

В тепловых энергетических установках (ТЭУ) капиллярно-пористые материалы используются для охлаждения высокофорсированных детонационных горелочных устройств [3], создания пароохладителей в паровых котлах [9], маслоохладителей, исключаящие попадания масла в охлаждающую воду и воды в систему подшипников [10], лабиринтных уплотнений [11], и в других устройствах [21]. Основные области практического применения капиллярно-пористых систем представлены в [3, 5, 8-11].

Капиллярно-пористые системы позволяют достигнуть экономии топлива, сырья, воздуха, воды, тепла, повысить надежность охлаждения и взрывопожаробезопасность работы оборудования, способствовать высокоэффективному разрушению горных пород, бетонов, металлов, уменьшить низкотемпературную коррозию поверхностей, сократить загрязнению биосферы ядовитыми газами, пылью, теплом, ускорить решение проблем продовольственной программы, получить большой экономический и социальный эффекты в области экологии и охраны труда.

Авторы [12] проводят сравнительный анализ методов расчета теплоотдачи по кипению воды с недогревом в вертикальных каналах, причем считают очаговую коррозию оболочек твэлов ядерных реакторов аналогом капиллярно-пористой структуры [13, 14]. Однако исследования теплообмена по регулярной структурированной поверхности не проводились.

По мнению авторов [15, 16], поверхностное кипение на пористых поверхностях может влиять на развитие коррозии из-за эрозионного воздействия на поверхность теплообмена при схлопывании пузырей пара в недогретой жидкости. Поэтому требуется исследовать парообразование жидкости в капиллярно-пористых структурах в поле капиллярных и массовых сил с учетом скорости и недогрева, которые создаются избытком жидкости.

Оценка интенсивности теплообмена для кипения жидкости в большом объеме и тонких пленках на гладкой поверхности показала на их равные возможности [12-14] при высоких тепловых потоках и на более высокие показатели теплопередачи, чем у систем с капиллярно-пористым покрытием [15, 16]. Требуется провести исследования теплопередающих возможностей капиллярно-пористых покрытий, работающих в поле капиллярных и массовых сил, и установить величины предельных (критических) нагрузок, приводящих к разрушению поверхностей нагрева.

Проведенные исследования позволяют дать рекомендации по выбору теплоносителя, учесть вид его циркуляции, определить геометрию и материал аппаратов и интенсификаторов теплообмена, с учетом условий и ориентаций работы системы под давлением или разрежением, подводом и видом энергии, ориентации системы. Обобщение экспериментальных результатов и методика расчета тепло- и массообмена в капиллярно-пористых системах представлены в [17-21].

Модель капиллярно-пористой структуры системы охлаждения. Модель капиллярно-пористого покрытия, нанесенного на охлаждаемую поверхность теплонагруженного элемента энергоустановок, показана на рисунке 1. При наступлении кризиса кипения возникает предельное состояние поверхности нагрева и происходит разрушение последней вместе с покрытиями. Такая схема позволяет моделировать трещины хрупких покрытий и пластических пористых структур.

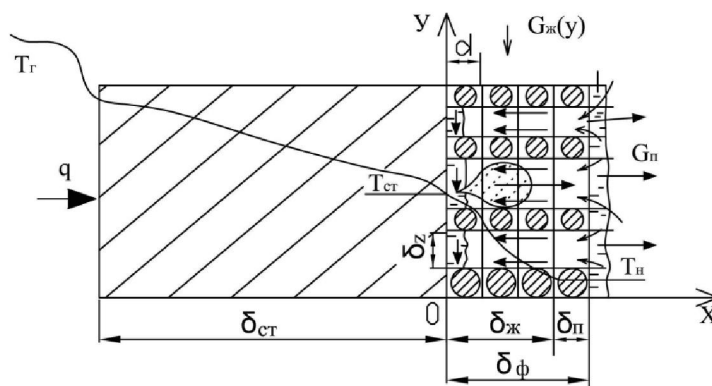


Рисунок 1 – Физическая модель процессов тепломассопереноса в пористой структуре, покрывающей охлаждаемую поверхность: прямые линии – движение жидкости; волнистые линии – движение пара; q – тепловой поток, $T_g, T_{ст}, T_n$ – температура газов, стенки, насыщения; $G_j(y), G_n$ – расход жидкости и пара; $\delta_{ст}, \delta_\phi, \delta_j, \delta_n$ – толщина парогенерирующей поверхности, пористого покрытия, жидкости и пара, b_z, d – ширина ячеек пористого покрытия и диаметр зерен

Механизм и расчет предельного состояния поверхности теплообмена. Результат расчетов представлен на рисунках 2–5. Максимальная толщина частиц, отрывающихся под действием сил сжатия для покрытий из гранита, составляет $(0,25-0,3) \cdot 10^{-2}$ м, что согласуется с результатами, полученными скоростной киносъемкой (рисунок 6). Участки кривых сжатия, определяющие отрыв частиц с размером $\delta > 0,3 \cdot 10^{-2}$ м для больших тепловых потоков и малых τ , экранируются кривой плавления, а в случае малых тепловых потоков и значительных интервалов времени – кривой растяжения.

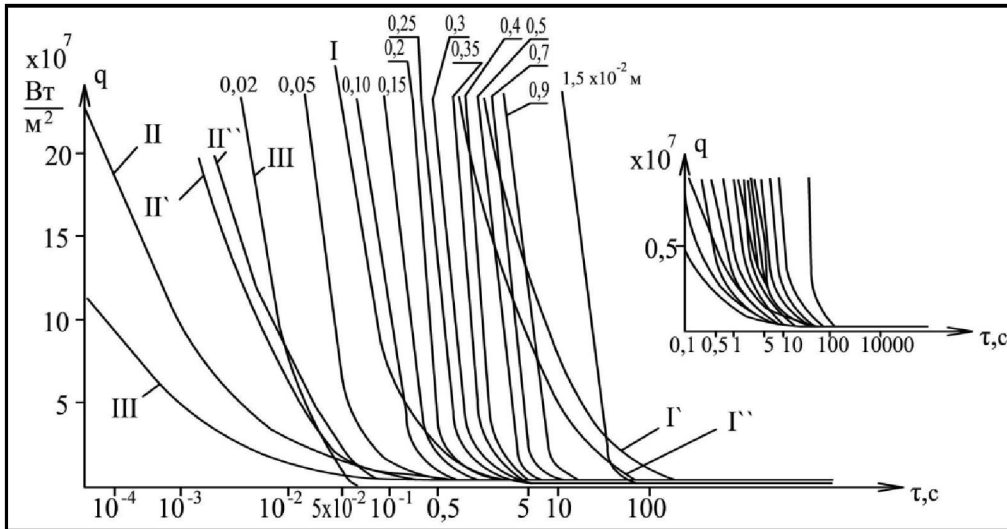


Рисунок 2 – Зависимость тепловых потоков, вызывающих напряжения сжатия III гранитного покрытия в зависимости от времени действия τ для различной толщины δ отрывающихся частиц:
 I – напряжения растяжения, достаточные для разрушения (Γ , Γ' – медь и нержавеющая сталь, $h = 0,1 \cdot 10^{-3}$ м);
 II – оплавление поверхности (Π , Π' – медь и нержавеющая сталь, $h = 0,1 \cdot 10^{-3}$ м)

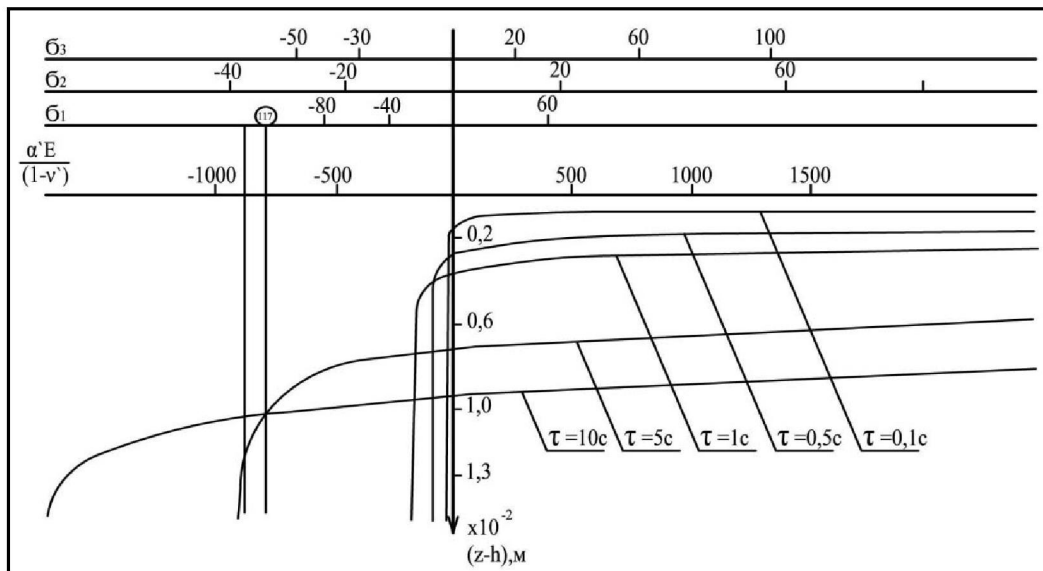


Рисунок 3 – Эпюры напряжений по толщине граничной пластины при различных тепловых потоках и времени их действия: $q_1 = 0,142 \cdot 10^7$ Вт/м²; $q_2 = 0,142 \cdot 10^7$ Вт/м²; $q_3 = 0,075 \cdot 10^7$ Вт/м²;
 Π_{17} – предел прочности на растяжение: σ , $\cdot 10^5$ Н/м², E , $\cdot 10^5$ Н/м²

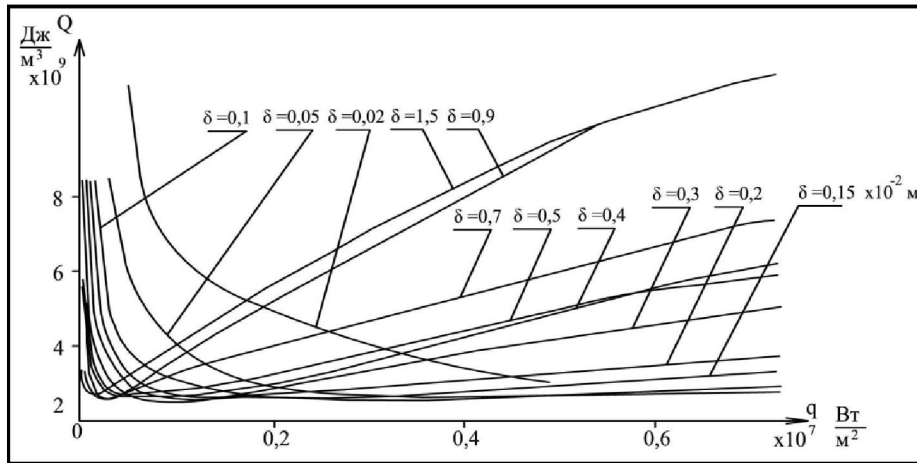


Рисунок 4 – Изменение удельной энергии разрушения Q гранитного покрытия в зависимости от q для различных δ . $Q = q \tau / \delta$

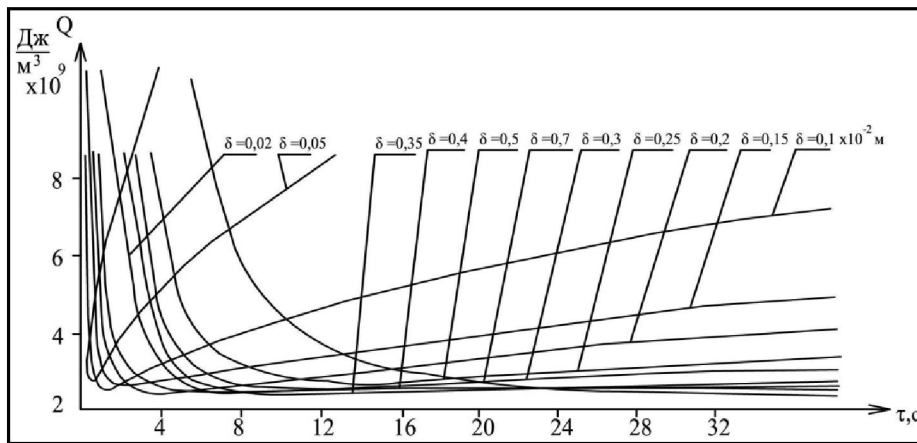


Рисунок 5 – Изменение удельной энергии разрушения Q гранитного покрытия в зависимости от τ для различных δ

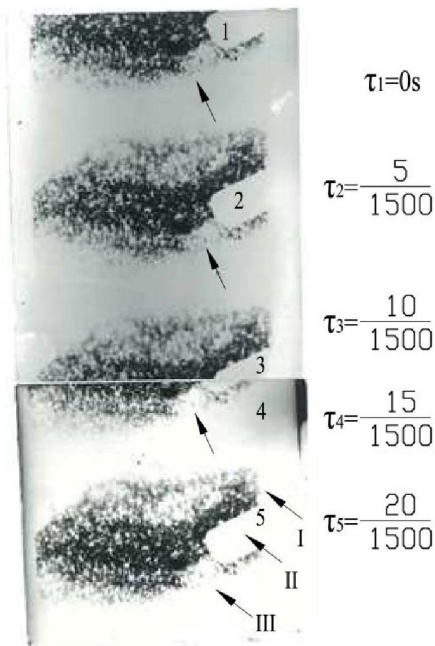


Рисунок 6 – Кинограмма полета (шелухи) размером $\delta = 2,5 \cdot 10^{-3}$ м при разрушении частицы гранитного покрытия горелкой ракетного типа ($q = 1,2 \cdot 10^6$ Вт/м²):

I – капиллярно-пористое покрытие;
 II – ствол горелки, из которого истекает сверхзвуковой высокотемпературный, пульсирующий детонационный поток газов;
 III – частица, оторванная от покрытия

Взаимосвязь напряжений сжатия и растяжения представляют собой эпюры напряжений внутри пластины для различных интервалов времени от начала рассматриваемого процесса. При малых τ , порядка 10^{-1} с возникают только напряжения сжатия. Начиная с $\tau \approx 1$ с, в некоторой области Δ ($h-z_1$) до $0,3 \cdot 10^{-2}$ м, напряжения сжатия переходят в напряжения растяжения за весьма короткий промежуток времени, причем для различных интервалов времени они находятся на различной глубине от поверхности пластины.

Верхним пределом устойчивого разрушения покрытия из кварца является -10^7 Вт/м², а из гранита – до $0,5 \cdot 10^7$ Вт/м², а нижним пределом, когда еще наблюдается отрыв частиц под действием термонапряжений сжатия $-0,25 \cdot 10^7$ и $0,05 \cdot 10^7$ Вт/м² соответственно.

Разрушение анизотропной среды под действием направленного нагрева основано на неравномерном расширении ее составляющих (кристаллов). Нагреваемый слой породы покрытия, увеличиваясь в объеме, начинает оказывать давление на соседние, менее нагретые слои. Так как расширению во всех других направлениях препятствует реакция непрогретых слоев, то порода начинает свободно расширяться с открытой стороны и в силу своей перенапряженности отделяется и откалывается.

Если полости вакансий могут превращаться в дислокации, то обучаемое покрытие приобретает пластические свойства и не разрушается под действием факела. Таковые все металлы. Этим свойством обладают также и некоторые породы. Проведено тестирование с парогенерирующими металлическими поверхностями нагрева в момент кризиса кипения [2]. Для металлов кристаллы разрушаются при направлениях до 10^{-5} В. Процесс разрушения состоит из стадий зарождения трещин и их развития. В результате термического воздействия зарождаются микротрещины в области концентраторов напряжений (включения, неоднородности, трещины). Высокие внутренние напряжения так же могут возникать вследствие неоднородного протекания пластической деформации, после чего возникает хрупкое разрушение. Пластическая деформация при этом рассматривается как первопричина разрушения, хотя она может задерживать рост трещин. В основе разрушения, с одной стороны, лежат разрывы связей, обусловленные тепловыми флуктуациями, а с другой – разрушение есть кинетический термоактивационный процесс, в основе которого лежит перемещение вакансий к трещинам, рост которых определяет кинетику разрушения.

Заключение. На основе проведенных исследований в случае облучения факелом керосино-кислородной горелки пористого покрытия на рабочем участке имеем до $4 \cdot 10^7$ Вт/м², что соответствует q покрытий $0,4 \cdot 10^7$ Вт/м². Механизм разрушения металлов принципиально отличается от механизма разрушения покрытий из горных пород. Несмотря на это, на основе аналогии выявлены зависимости тепловых потоков от времени их действия и глубины проникновения температурных возмущений, что позволяет избежать кризиса кипения в системе охлаждения и обеспечить оптимальный подбор пористых покрытий малой пористости и теплопроводности. В перспективе требуется исследование других пористых природных материалов.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Polyayev V.M. et al. 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, USA, 1995. – Vol. 10. – P. 273-286.
- [2] Polyayev V.M., Genbach A.A. Heat Transfer in a Porous System in the Presence of Both Capillary and Gravity Forces // Thermal Engineering. 40 (1993), 7. P. 551-554.
- [3] Поляев В.М., Генбач А.Н., Генбач А.А. Предельные состояния поверхности при термическом воздействии // Теплофизика высоких температур. – 1991. – Т. 29, № 5. – С. 923-934.
- [4] Polyayev V.M., Genbach A.A. Control of Heat Transfer in a Porous Cooling System // Proceedings, 2nd World Conference on Experimental Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics. – Dubrovnik, Yugoslavia, 1991. P. 639-644.
- [5] Поляев В.М., Генбач А.А., Минашкин Д.В. Процессы в пористом электрическом теплообменнике // Известия вузов. Машиностроение. – 1991. – № 4-6. – С. 73-77.
- [6] Генбач А.А., Бакытжанов И.Б. Защита от землетрясений фундаментов ТЭС с помощью пористых геозкранов // Поиск. МОН РК. – 2012. – № 1(2). – С. 289-298.
- [7] Генбач А.А., Данильченко И. Пористый пароохладитель паровых котлов // Промышленность Казахстана. – 2012. – № 1(70). – С. 72-75.
- [8] Генбач А.А., Олжабаева К.С. Визуализация термического воздействия на пористой материал в ТЭУ ЭС // Вестник Национальной инженерной академии РК. – 2012. – № 3(45). – С. 63-67.

- [9] Генбач А.А., Исламов Ф.А. Исследование присопловой галтели в энергоустановках // Вестник КазНТУ. – 2013. – № 3(97). – С. 245-248.
- [10] Генбач А.А., Байбекова В.О. Моделирование теплообмена в пористой системе охлаждения подшипника турбины // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. – 2017; 60 (6). – С. 558-570.
- [11] Поляев В.М., Генбач А.А. Управление теплообменов в пористой структуре // Известия Российской академии наук. Энергетика и транспорт. – 1992. – Т. 38, № 6. – С. 105-110.
- [12] Jamialahmadi M., et al. Experimental and Theoretical Studies on Subcooled Flow Boiling of Pure Liquids and Multicomponent Mixtures // Intern. J Heat Mass Transfer. 51 (2008), 9-10. – P. 2482-2493.
- [13] Ose Y., Kunugi T. Numerical Study on Subcooled Pool Boiling // Progr. In Nucl. Sci. and Technology. – 2, (2011). – P. 125-129.
- [14] Krepper E., et al. CFD Modeling Subcooled Boiling-Concept, Validation and Application to Fuel Assembly Design // Nucl. Eng. and Design. – 237 (2007), 7. – P. 716-731.
- [15] Ovsyanik A.V. Modelling of Processes of Heat Exchange at Boiling Liquids // Gomel State Technical University named after P.O. Sukhoy, Gomel, Belarus, 2012 (in Russian).
- [16] Alekseik O.S., Kravets V.Yu. Physical Model of Boiling on Porous Structure in the Limited Space // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 64 (2013), 4/8. – P. 26-31.
- [17] Поляев В.М., Генбач А.А., Анализ законов трения и теплообмена в пористой структуре // Вестник МГТУ. Серия Машиностроение. – 1991. – С. 86-96.
- [18] Поляев В.М., Генбач А.А., Бочарова И.Н. Влияние давления на интенсивность теплообмена в пористой системе // Известия вузов. Машиностроение. – 1992. – № 4-6. – С. 68-72.
- [19] Поляев В.М., Генбач А.А. Области применения пористой системы // Известия вузов. Энергетика. – 1991. – № 12. – С. 97-101.
- [20] Genbach A.A., Jamankylova N.O., Bakic Vukman V. The processes of Vaporization in the Porous Structures Working With The Excess of Liquid // Thermal Science: 2017. – Vol. 21, N 1A. – P. 363-373. – DOI: 10.2298/TSCI160326313G.
- [21] Genbach A.A., Olzhabayeva K.S., Iliev I.K. Boiling Process in oil Coolers on Porous Elements // Thermal Science: 2016. Vol. 20, N 5. – P. 1777-1789. – DOI: 10.2298/TSCI150602166G.

А. А. Генбач, Д. Ю. Бондарцев

Алматы энергетика және байланыс университеті, Алматы, Қазақстан

ҚЫЛТҮТІКТІ-КЕУЕКТІ ОРТАМЕН ЖАБЫЛҒАН ЖЫЛУАЛМАСУ БЕТІНІҢ ШЕКТІК КҮЙІН ЗЕРТТЕУДІҢ ТӘЖРИБЕЛІК ӘДІСІ

Аннотация. Қылтүтікті-кеуекті жүйелер жоғары қарқындылыққа, жоғары жылуберу қабілеті мен сенімділік және ықшамдылық қасиеттеріне ие. Тәжірибе мен есептеулер нәтижелері көрсеткендей, граниттен жасалған жабындылар үшін сығу күштері әсерінен жұлынып алынатын бөлшектердің максималды қалыңдығы $(0,25 \div 0,3) \cdot 10^{-2}$ м. Үлкен жылу ағындары мен берістің аз уақыты үшін өлшемдері $0,3 \cdot 10^{-2}$ м артық бөлшектердің жұлынып алынуын анықтайтын сығу қисықтарының аумағы балқу қисығымен, ал кіші жылу ағындары мен уақыт интервалдары үшін – созылу қисықтарымен экрандалады. Зерттеулер өткізгіштігі нашар және өткізгіштігі жақсы материалдардан суыту жүйелерінде кеуекті жабындыларды жасауға бағытталған.

Түйін сөздер: жылуберу кризисі; капиллярлы-кеуекті құрылым, жылулық энергоқондырғылар, суыту жүйелері.

Сведения об авторе:

Генбач А. А. – доктор технических наук, профессор АУЭС, Алматы, Казахстан,

Бондарцев Д. Ю. – докторант АУЭС, ведущий инженер, АО «Трест Средазэнергоустановка», Алматы, Казахстан, d.bondartsev@saem.kz