

5. Ladson C.L. Effects of Independent Variation of Mach and Reynolds Numbers on the Low-Speed Aerodynamic Characteristics of the NACA 0012 Airfoil Section. NASA TM-4071, October 1988.

6. Spalart P.R. A one-equation turbulence model for aerodynamic flow. *AIAA Paper*. No. 92. 0439. 1992. 22 p.

7. Wright W.B. Users Manual for the Improved NASA Lewis Ice Accretion Code LEWICE 1.6, National Aeronautical and Space Administration (NASA), Contractor Report. May, 1995. 95 p.

Надійшла до редколегії 11.06.2018 р.

УДК 536.24: 536.423.1

КРИЗИС ТЕПЛОТДАЧИ В ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ИСПАРИТЕЛЯХ С СОСТАВНОЙ КАПИЛЛЯРНО-ПОРИСТОЙ СТРУКТУРОЙ В ВЫХОДНОМ СЕЧЕНИИ

С. А. Белогуров

*Днепропетровский национальный университет имени Олеся Гончара, пр. Гагарина, 72, г. Днепр,
49010, Украина, e-mail: steams@ukr.net*

Наведено результати експериментального дослідження умов погіршення тепловіддачі при кипінні калію в прямотрубному випарнику зі складовою капілярно-пористою структурою у вихідному перерізі. Встановлено область масових швидкостей, в якій граничний паровміст з погіршенням тепловіддачі у складовій капілярно-пористій структурі виявився вище, ніж у гладкотрубних і у випарниках з простою капілярною структурою.

Ключові слова: парогенератор, випарник, лужні метали, рідкі метали, капілярно-пориста структура, криза тепловіддачі.

Results of experimental research represent conditions of heat transfer deterioration for boiling potassium in a straight-through evaporator with a composite capillary-porous structure in the output section. A region of mass velocities is identified, where boundary vapor content, with heat transfer deterioration in the composite capillary-porous structure, is higher than in smooth-tube evaporators and evaporators with a simple capillary structure.

Keywords: Steam Generator, evaporator, alkali metals, liquid metals, capillary-porous structure, heat transfer crisis.

Приведены результаты экспериментального исследования условий ухудшения теплоотдачи при кипении калия в прямотрубном испарителе с составной капиллярно-пористой структурой в выходном сечении. Установлена область массовых скоростей, в которой граничные паросодержания с ухудшением теплоотдачи в составной капиллярно-пористой структуре оказались выше, чем в гладкотрубных и в испарителях с простой капиллярной структурой.

Ключевые слова: парогенератор, испаритель, щелочные металлы, жидкие металлы, капиллярно-пористая структура, кризис теплоотдачи.

Повышение эффективности энергетических установок космического и наземного базирования связано с использованием рабочих тел, имеющих высокие критические параметры, такие как давление ($P_{кр}$) и температура ($T_{кр}$). К таким телам следует отнести жидкие и щелочные металлы, в частности калий.

На протяжении более 30 лет эти проблемы решались в лаборатории «Тепловых установок» Днепропетровского национального университета имени Олеся Гончара Ю.Д. Морозовым, В.Ф. Присняковым, А.Н. Приваловым, С.В. Ткаченко, А.А. Хоменей.

Результаты этих исследований были представлены в многочисленных работах, опубликованных в нашей стране и за рубежом.

В работах [6; 7] было представлено описание экспериментального стенда для исследования кризиса теплоотдачи в жидкометаллических испарителях, а также изложена методика экспериментов и дано описание исследуемых образцов.

Для получения сухого насыщенного пара, необходимого для нормальной работы турбины энергоустановки, были предприняты некоторые конструктивные

решения, в частности, создание прямоточного калиевого парогенератора [7; 1].

Ранее было установлено, что покрытие капиллярно-пористой структурой (КПС) всей внутренней поверхности парогенератора ведет к кризису в сечении закипания испарителя, что не дает возможности использования его в широком интервале изменения массовых скоростей и удельных тепловых потоков при граничном паросодержании, близком к единице.

В последующих экспериментальных образцах КПС наносилась в выходном сечении для повышения степени сухости пара и устранения «ручейкового» высыхания пленки [6]. Для определения длины КПС рассматривалась физическая модель гидродинамического процесса, соответствующего предкризисной ситуации в парогенераторе с капиллярно-пористой структурой, нанесенной на внутреннюю поверхность в выходном сечении. Поскольку в выходной части парогенератора реализуется дисперсно-кольцевой режим течения [5], то часть жидкости в виде пленки течет по поверхности КПС, а часть внутри КПС до некоторого сечения X_0 , как показано на рис. 1.

При сравнении полученных значений $X_{ух}$ для различных массовых скоростей (rw), представленных на рис. 2, видно, что в парогенераторе с КПС отсутствует кризис орошения, который наблюдался в гладкой трубе и описывался участком СМ, это явление, по мнению авторов, объясняется в [7]. При достижении пленкой критической толщины $\delta_{кр}$ на участке $l_{кр2}$ (рис. 1) происходит срыв капель с ее поверхности и унос их в ядро потока. При некотором значении теплового потока поверхность капиллярно-пористой структуры на выходе из парогенератора осушается на некоторой длине и капли, достигая ее поверхности, не смачивают КПС в силу эффекта «запаривания» [4].

Таким образом, выходная часть парогенератора, с КПС на внутренней поверхности, разбивается на два участка.

Первый участок, равный длине $l_{кр1}$, для которого реализуется модель испарения

жидкости, аналогичная для гладкой трубы, т.е. испарение происходит с пленки.

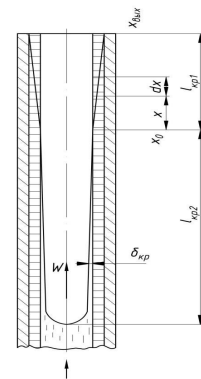


Рис. 1. Схема распределения жидкого калия в испарителе

Второй участок, равный $l_{кр1}$, характеризуется испарением жидкого металла с внутреннего объема капиллярной структуры.

Суммарная длина КПС обеих участков, установленная в выходном сечении парогенератора, обеспечит эффективную его работу. Математическая модель определения эффективной длины КПС дана в [2].

Для исследуемых экспериментальных образцов рассчитанная длина КПС составляла порядка 600 мм.

На последующих трех экспериментальных образцах КПС наносилась на половине длины испарителя, примыкающей к выходному сечению. Сечение закипания находилось на гладкой части парогенератора и кризис теплообмена в его окрестности не возникал.

Значение $X_{ух}$ для различных rw приведены на рис. 2 в сравнении с данными, полученными на гладкой трубе. Анализ полученных результатов был дан ранее в [7].

Наличие КПС на выходе парогенерирующего канала позволяет реализовать бескризисную работу прямоточного калиевого испарителя в диапазоне паросодержаний $0 < X < 1$ и в области массовых скоростей $rw = (0-150 \text{ кг/м}^2\text{с})$. Причем паросодержание ($X_{ух}$), близкое к единице, наблюдалось при массовых скоростях только в пределах до $70-80 \text{ кг/м}^2\text{с}$.

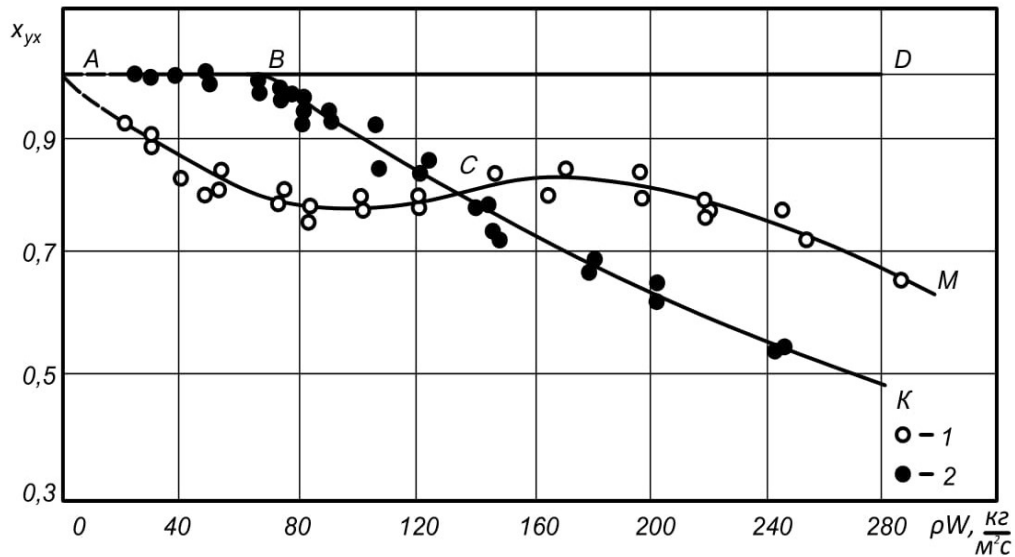


Рис. 2. Влияние массовой скорости на ухудшение теплоотдачи в каналах с $d=8$ мм стенкой, $p=1,2-1,5$ бар, $X_{вх}=-(0,13-0,25)$, $q=(0,06-0,74)$ МВт/м $l/d=170$; 1 – с гладкой 2 ; 2 – с капиллярно-пористым покрытием стенки, $\delta_{ст}=0,3$ мм; $\Pi=80$ %, $p=1,2-1,4$ бар, $X_{вх}=-(0,12-0,21)$, $q=(0,07-0,42)$ МВт/м 2

Эти пределы ограничений могут быть расширены путем изменения гидродинамических характеристик и геометрических параметров КПС, что может привести к кризису 1-го рода (вскипанию жидкого металла вследствие перегрева его внутри КПС).

Наиболее перспективным направлением дальнейшего совершенствования эффективности прямотрубных жидкометаллических парогенераторов является использование составной капиллярно-пористой структуры на выходе из испарителя.

Очевидно, что основным ограничивающим фактором теплообмена являлась КПС, установленная на выходе из парогенератора, в силу малой ее толщины (0,3 мм), а также из-за возможного перегрева теплоносителя и, как следствие, его вскипания, так и низкого коэффициента проницаемости ($k=30 \cdot 10^{-11} \text{ м}^2$). Для этого были проведены экспериментальные исследования на составных капиллярно-пористых структурах, выполненных в виде тепловых труб.

Экспериментальные образцы представляют собой цилиндры из нержавеющей стали 12X18H10T наружного диаметра 20 мм и длиной 700 мм. На внутренней поверхности цилиндра были выполнены продольные канавки глубиной

0,7 мм, шириной 0,7 мм и шагом 1,4 мм. Поверх канавок 1-го экспериментального образца укладывались два слоя сетки № 685 саржевого плетения толщиной 0,2 мм каждый. Объемная пористость сетки составляла порядка 38–40 %. Сетка выполнялась из нержавеющей стали 12X18H10T.

У второго образца поверх канавок на внутреннюю поверхность стенки цилиндра укладывался экран, выполненный из спеченного порошкового материала из стали 12X18H10T по технологии института проблем материаловедения АН УССР (КИПМ). Толщина экрана составляла 0,195 мм. Объемная пористость спеченного материала была порядка 40–42 %. Экраны, изготовленные из сетки и порошка, выполнялись в виде труб, которые по плотной посадке входили внутрь экспериментальных образцов. Шов экранов проваривался в три ряда точечной сваркой с шагом 0,5–1 мм, расположенными шахматным порядком.

Третий образец выполнялся из стали 12X18H10T в виде цилиндра с наружным диаметром 17 мм и длиной 700 мм. На внутренней поверхности были выполнены канавки глубиной 0,4 мм, шириной 1,64 мм и шагом 2,14 мм. Вовнутрь корпуса трубы по плотной скользящей посадке вставлялся

пористый экран, выполненный из металловолокна, изготовленного из стали 12Х18Н10Т по технологии КИПМ, шов которого проваривался роликовой сваркой. Толщина экрана составляла 0,6 мм, а объемная пористость – 40 %.

Все три образца заправлялись химически чистым калием из условий полной заправки КПС и канавок с 10 % перезаправкой при минимальной рабочей температуре и герметизировались. Перед установкой на стенд образцы выдерживались в муфельной печи при температуре 600–700 °С в течение 20 часов до полного смачивания калием КПС. Предварительно экспериментальные образцы вакуумировались до 10^{-6} мм рт.ст.

На расстоянии 110 мм, от одного из краев, на экспериментальных участках располагался коаксиально теплообменник с тангенциальным входом и выходом греющего натрия. Тепловой поток определялся калориметрическим методом путем измерения температуры входа и выхода натрия, а также его расхода. В зоне подвода тепла устанавливался охранный нагреватель, который компенсировал тепловые потери в окружающую среду.

Зона конденсации калия охлаждалась потоком воздуха от центробежного вентилятора.

Эксперименты проводились сериями. Первоначально устанавливалась заданная температура натрия на входе в теплообменник для обогрева экспериментального образца. Расходом охлаждающего воздуха устанавливалось и поддерживалось на протяжении всей серии постоянным давление насыщения $P_s = f(T_s)$, которое определялось термопарой, установленной внутри экспериментального образца посередине испарителя в трубке

диаметром 2 мм с толщиной стенки 0,15 мм. Затем температура натрия на входе в теплообменник плавно, небольшими ступеньками $5 \div 10$ °С повышалась.

Информационно-измерительная система регистрировала в это время температуру входа и выхода натрия в теплообменнике, температуру насыщения калия в экспериментальном образце, сигнал электромагнитного расходомера натрия и три температуры в зоне конденсации калия.

Температура натрия на входе в теплообменник повышалась вплоть до возникновения кризиса теплоотдачи при испарении калия из капиллярно-пористой структуры испарителя.

Этот момент определялся по началу уменьшения разности температур натрия на входе и выходе из теплообменника обогрева по сравнению с предшествующей ступенькой, свидетельствующему об ухудшении теплоотдачи, а также по падению, при неизменном расходе воздуха, температуры насыщения в зоне испарения, означающему о снижении в нее пароприхода.

После этого основной нагреватель натрия выключался. Установка охлаждалась, а затем снова приводилась в разогретое состояние.

Далее менялся один из исследуемых параметров – давление насыщения или угол наклона экспериментального образца к горизонтальной плоскости, и эксперименты повторялись.

Полученные результаты представлены на рис. 3 в сопоставлении с данными [8].

Поскольку исследования кризиса теплоотдачи в экспериментах проводились для различных давлений ($P_s = 0,02 \div 0,37$ бар), определялось влияние P_s на $q_{кр}$.

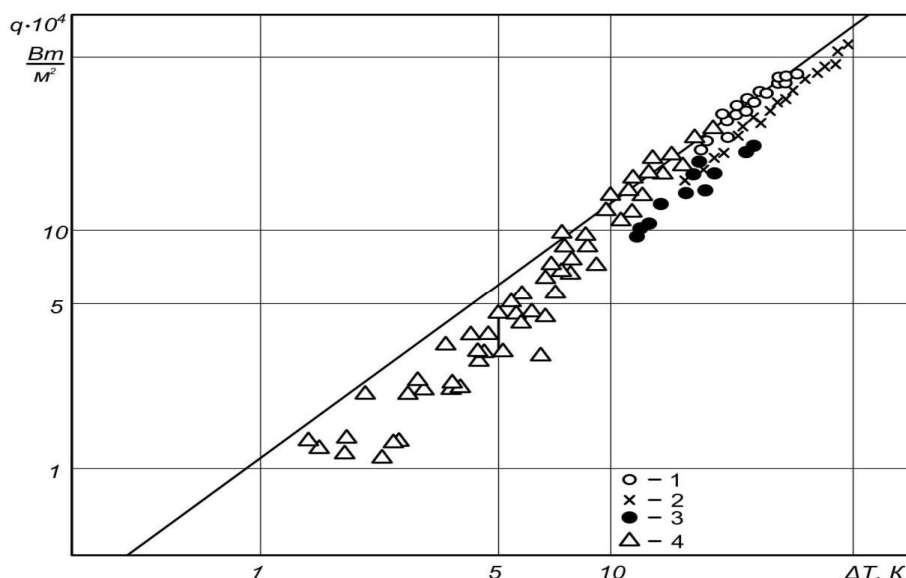


Рис. 3. Зависимость удельного теплового потока от перепада температур при испарении жидкого калия из КПС: 1 – металлическойлок; 2 – сетка; 3 – металлопорошок; 4 – данные работы [8]

Математическая обработка результатов в логарифмических координатах дала следующие зависимости:

$$q_{кр} = 0,171 \cdot 10^6 P_s^{0,1} \text{ — для сетки}$$

$$q_{кр} = 0,15 \cdot 10^6 P_s^{0,1} \text{ — для войлока}$$

$$q_{кр} = 0,095 \cdot 10^6 P_s^{0,1} \text{ — для порошка}$$

С учетом давления насыщения $P_s = 1,2 \div 1,5$ бар, которые были характерны при исследовании прямотрубных испарителей и применении составной капиллярно-пористой структуры, на выходе из прямотрубного парогенератора массовая скорость достигла бы $240 \div 280 \text{ кг/(м}^2\text{с)}$ и степени сухости пара, близкой к единице (рис. 2, линия BD).

Таким образом, подбирая геометрию составной КПС, можно добиться максимального коэффициента фильтрации, максимального капиллярного давления (P_k) и коэффициента испарения (f) [3] на искривлённой поверхности.

Библиографические ссылки

1. Андреев П.А., Боришанский В.М., Федорович Е.Д. и др. Тепло- и массоперенос при физико-химических превращениях. Минск: ИТМО. 1972. Т. 2. С. 352.
2. Белогуров С.А. Определение эффективной длины капиллярно-пористой структуры в жидкометаллических испарителях. *Проблемы высокотемпературной техники*: сб. научных трудов. Днепропетровск. ДДУ. 1999. С.11–15.

3. Белогуров С.А. Физическая модель испарения жидкого металла из капиллярно-пористой структуры. *Проблемы высокотемпературной техники. ДНУ*: сб. научных трудов. 2001.

4. Гонтарев Ю.К., Луценко В.И., Наврузов Ю.В., Сидушкин В.М. Экспериментальное исследование натриевой тепловой трубы. *ТВТ*. 1983. Т. 21. № 4. С. 812–815.

5. Зейгарник Ю.А., Литвинов В.Д. Кипение щелочных металлов в каналах. Москва: Наука, 1983. С.126.

6. Морозов Ю.Д., Присняков В.Ф., Привалов А.Н., Гонтарев Ю.К., Белогуров С.А. Исследование условий ухудшения теплоотдачи при вынужденном течении парокалиевого потока в прямой вертикальной трубе. *ТВТ*. 1987. Т. 25. № 3. С. 528–536.

7. Морозов Ю.Д., Привалов А.Н., Присняков В.Ф., Гонтарев Ю.К., Белогуров С.А. Исследование условий ухудшения теплоотдачи при кипении калия в вертикальных каналах с капиллярно-пористой структурой на внутренней поверхности. *ТВТ*. 1989. Т. 27. № 4. С. 730–736.

8. Devis W.R., Ferral I.K. Evaporative heat transfer of potassium in porous media. *AIAA-ASME Thermophysical and Heat Transfer Conf. Boston. Massachuets*. 1974.

Надійшла до редколегії 29.06.2018 р.