

Оскільки концентрація спінюючого агента не може перевищувати 40 % (обумовлено якістю виробу), то для визначення впливу концентрації спінюючого агента запропоновано рівняння Ейнштейна:

$$\mu = \mu_n \left[1 + 2,5\varphi \left(\frac{\mu_c + 0,4\mu_n}{\mu_n + \mu_c} \right) \right].$$

Висновки

1. У результаті проведених дослідів встановлено реологічні залежності для деяких композицій в'язкотекучого розплаву термопластів, які містять рідини, які закипають при низьких температурах у якості пороутворювачів. Отримані залежності

придатні для інженерних розрахунків екструзійного устаткування та формуючих пристроїв обладнання для виготовлення спінистих полімерів.

2. Досліди, що були проведені на готових виробках показали, що напруга зсуву на 7...15 % нижча, ніж у чистого полімеру. Одержано аналітичні залежності напруги зсуву від швидкості зсуву при різних температурах. Отримані дані можна екстраполювати для наближеного обчислення при інженерних розрахунках екструдерів для виготовлення спінистих композицій. Дані придатні для проектного розрахунку обладнання повторної переробки спінистих виробів.

Одержано 29.10.2004 г.

УДК 534.24\621.472\621.412\662.99\666.1.031.2

МАЛЕЦКАЯ О.Е.

Ин-т технической теплофизики НАН Украины

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ РЕЖИМОВ НАЧАЛА ВСКИПАНИЯ НАТРИЯ В ТЕПЛОВОЙ ТРУБЕ

Розглянуто умови підвищення надійності та розширення можливостей використання відомої конструкції сонячної високотемпературної енергоустановки на основі двигуна Стірлінга та натрієвого випарника для рішення задач енергозбереження та організації стаціонарного енергопостачання за рахунок теплоти спалювання природного газу. Вперше отримано численні експериментальні дані по перегрівам при скипанні натрію в випарнику високотемпературної теплової труби. Приведено співставлення отриманих нових результатів по початку скипання натрію з відомими даними по кипінню у великому об'ємі.

Рассмотрены условия повышения надежности и расширения возможностей использования известной конструкции солнечной высокотемпературной энергоустановки на основе двигателя Стирлинга и натриевого испарителя для решения задач энергосбережения и организации стационарного энергоснабжения за счет теплоты сгорания природного газа. Впервые получены обширные экспериментальные данные по перегревам при вскипании натрия в испарителе высокотемпературной тепловой трубы. Приведено сопоставление полученных новых результатов по началу вскипания натрия с известными данными по кипению в большом объеме.

The conditions of reliability increase and expansion of opportunities of a known design use of the solar high-temperature energy installation are considered on the basis of the Stirling engine and sodium evaporator for the solving the problems of energy saving and organization the stationary power supply at the expense of the natural gas combustion heat. Extensive experimental data on superheating are received for the first time at sodium incipient boiling in an evaporator of a high-temperature heat pipe. The comparison of the received new results on the sodium incipient boiling with the known data on boiling in large volume is given.

P_s – давление насыщения пара натрия МПа;

Q – тепловой поток, кВт;

q – плотность теплового потока, Вт/см²

$T_{нк}$ – перегрев при вскипании, °С;

T_s – температура насыщения пара натрия, °С;

ДС – двигатель Стирлинга;

РИ – ресивер-испаритель;

ТТ – тепловая труба.

Введение

В настоящее время активно развивается программа разработки энергоустановок, использующих зеркальные параболические концентраторы для преобразования солнечной энергии в электричество с помощью двигателя Стирлинга с генератором. Основным звеном подобных энергоустановок, обеспечивающим их высокую эффективность, является система передачи теплоты солнечного излучения от наружной стенки концентратора к рабочему телу ДС [1].

Конструкция приемника концентрированной солнечной энергии представляет собой полусферический замкнутый купол ресивер-испаритель, к внутренней стенке которого методом спекания присоединена пористая структура (фитиль), насыщенная натриевым теплоносителем. Внутренний объем испарителя – тепловой трубы соединяется осевым каналом с рабочими головками цилиндров ДС, где при конденсации пара натрия теплота парообразования подводится к нагревательным трубкам, в которых циркулирует его рабочее тело – гелий.

Величина подводимого теплового потока Q в такой системе достигает 80 кВт, при этом плотность теплового потока q на поверхности теплоприемника-испарителя неоднородна и изменяется в интервале 5...80 Вт/см². Передача столь высоких q предъявляет жесткие требования к однородности поля температур на его наружной поверхности и транспортным характеристикам фитиля (капиллярно-пористого слоя на внутренней стенке испарителя), пропитанного теплоносителем (натрием). В оптимальном режиме работы передача теплового потока осуществляется путем теплопроводности через слой фитиля с последующим испарением теплоносителя с поверхности менисков пористой структуры. Такой режим реализуется до тех пор, пока перепад температур в фитиле не превысит перегрев, необходимый для начала кипения натрия, $T_{нк}$. В этом случае в сравнительно толстых фитилях солнечных испарителей в местах

подвода максимальных значений q и перепадов температур возможно вскипание натрия и локальное осушение фитиля в этих зонах, что приводит к образованию “горячих пятен” и повреждению пористого слоя [2].

Цели исследования

Целью исследования является идентификация модели процесса парообразования натрия в пористых структурах испарителей и уточнение условий ее возникновения. Задача решена на основе экспериментального исследования температурных напоров, характерных для начала вскипания натрия в испарителе высокотемпературной тепловой трубы, которые приводят к нарушению предельного режима испарительного отвода теплоты с поверхности раздела фаз и к возникновению кипения в зоне нагрева в интервале рабочих температур РИ.

Методы исследования

Для решения вышеупомянутой задачи применялись методы научного анализа и обработки известной доступной экспериментальной информации об исследовании процессов парообразования и теплообмена при кипении натрия в большом объеме и воды на поверхностях со спеченными пористыми покрытиями. Это было необходимо, поскольку пористые покрытия такого типа используются в натриевых РИ, а также целесообразно ввиду подобия механизма парообразования при кипении воды и натрия. В отечественной и зарубежной литературе содержится большой массив данных об исследовании теплообмена при кипении жидкометаллических теплоносителей на гладких поверхностях в большом объеме. Синтез научных представлений о механизме процессов парообразования, интенсивности теплообмена и о типах устойчивого и неустойчивого кипения (формы кривых кипения воды, калия и натрия) и сопоставление с экспериментальными данными позволили оценить границы подобных моделей

парообразования. Такой подход к решению этой задачи позволяет определить характерные условия вскипания натрия в объеме пористой структуры, нарушающие стабильный процесс испарения натрия с поверхности пористого слоя испарителя.

Обсуждение результатов

Экспериментальное исследование перегревов при вскипании натрия в испарителях ТТ было проведено на имеющемся универсальном стенде, предназначенном для изучения характеристик высокотемпературных тепловых труб и оснащенном соответствующим энергооборудованием и современной измерительной аппаратурой. Для проведения опытов использовались две тепловые трубы с натриевым теплоносителем одинаковой конструкции с составным фитилем, рис. 1. Составной фитиль представляет собой устройство с кольцевым каналом, заполненным натрием, в котором высокий капиллярный перепад давления обеспечивается мелкопористой структурой, расположенной на поверхности раздела фаз жидкость-пар. Малое сопротивление при перекачивании жидкой фазы из зоны конденсации в зону испарения обеспечивается в нем благодаря кольцевому каналу большого гидравлического диаметра. Локальное осушение такого фитиля, т.е. соединение полости зазора с паровым пространством, приведет к тому, что капиллярный перепад давления и работа ТТ будут определяться размерами зазора, а не размерами поверхностных пор малого размера в пористом экране. В случае, когда зазор под экраном велик, возможны трудности с первоначальным заполнением его натрием, а также с заполнением после удаления жидкой фазы из зазора вследствие недостаточности капиллярного перепада давления. Исследуемые нами ТТ были предназначены для использования в качестве ребер холодильника-излучателя космической энергоустановки. Поскольку их предварительные испытания проводились на стенде в земных условиях, то выбранная величина зазора 0,5 мм изначально обеспечивала необходимый капиллярный напор для его самозаполнения расплавленным жидким натрием. Локальное осушение фитиля под экраном возникает также при вскипании натрия в капиллярной структуре, т.е. при образовании “горячего пятна”, что и было использовано в настоящей методике

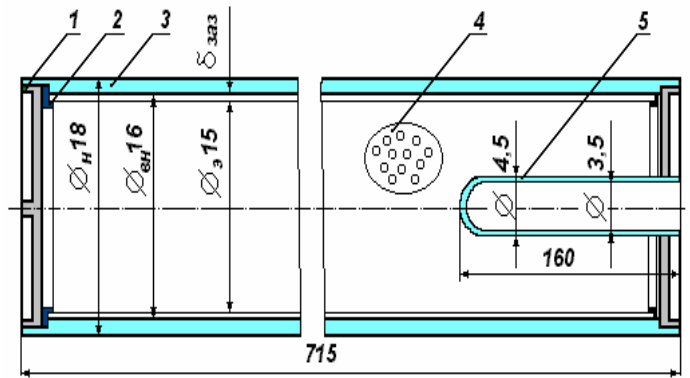


Рис. 1. Конструкция экспериментальной тепловой трубы: 1 – концевая заглушка; 2 – втулка кольцевого пористого экрана (ширина зазора $\delta_{заяз} = 0,5$ мм); 3 – корпус тепловой трубы; 4 – структура экрана (диаметр отверстий 0,5 мм, пористость $\varepsilon = 0,405$).

проведения опытов. Все детали ТТ были изготовлены из нержавеющей стали 1Х18Н9Т, совместимой по жаростойкости и коррозионным характеристикам с натрием. Конструктивно составной фитиль ТТ представляет собой пористый экран в виде цилиндрической трубки из фольги толщиной 0,1 мм, размещенной концентрично с зазором 0,5 мм относительно внутреннего диаметра корпуса, рис. 1.

Экран был выполнен из перфорированной фольги с отверстиями 0,5 мм, его пористость, $\varepsilon = 0,405$. В качестве теплоносителя использовался натрий чистотой 99,99 %, расфасованный в вакууме в герметичные кварцевые ампулы при давлении $1,33 \cdot 10^{-3}$ Па. Количество натрия, необходимое для заправки ТТ составляло 30 см^3 , оно определялось полным заполнением объема кольцевого зазора с избытком в 15...20 %. Заполнение ТТ натрием из ампул и все операции по сварке выполнялись при упомянутой величине вакуума в камере электронно-лучевой установки. Для измерения поля температур в паровом канале ТТ и при затоплении объема испарителя натрием в торцевые заглушки обеих ТТ были вварены терморезисторы длиной 160 мм, в которых размещались термодатчики. При проведении опытов ТТ устанавливалась на поворотной плите установки для определения основных характеристик в горизонтальном положении и при изменении ориентации оси ТТ в поле сил тяжести, что было необходимо

для определения перегревов при вскипании натрия.

Основа принятой методики определения начала вскипания натрия базировалась на известном положении о том, что интенсивный теплоотвод излучением со всей внешней поверхности горизонтально расположенной ТТ осуществляется благодаря испарению теплоносителя в сравнительно малой зоне нагрева. Вскипание натрия возникает лишь при его сливе в объем испарителя, что достигается поворотом плиты и подъемом конца конденсатора выше испарителя. Увеличение угла наклона оси ТТ более чем на 15° относительно горизонта приводило к полному затоплению натрием зоны нагрева из-за нарушения баланса капиллярного напора и воздействия массовых сил. Горизонтальное расположение края лужи у конца испарителя соответствовало наклону оси ТТ на $10-12^\circ$. Запуск ТТ и выход на заданный по температуре насыщения стационарный режим работы выполнялся при горизонтальном расположении плиты.

Подобная методика проведения опытов позволяла инициировать начало кипения натрия в затопленном испарителе и измерять соответствующие величины перегревов, обусловленные переходом от интенсивного испарительного режима отвода теплоты к локальному вскипанию в большом объеме. Предварительно в наладочных опытах была отработана методика определения места расположения «горячего пятна» при температурах выше 650°C . Это было возможно благодаря визуальному наблюдению зоны начала вскипания натрия в виде локального светлого пятна на верхней образующей ТТ на фоне более темной остальной поверхности испарителя. Локализация пятна в средней части испарителя практически не менялась при переходе на более высокие температуры, что позволило определить одинаковое место расположения спая дифференциальной термопары на наружной стенке и спаев термопар для измерения температуры насыщения пара внутри гильзы. Изменение ориентации ТТ в опытах обеспечивалось благодаря гибким кабелям, подводящим напряжение от системы электропитания к токовводам на поворотной плите для прямого нагрева ТТ.

Наиболее важной задачей при проведении опытов являлось получение достоверной информации

о величине температур в паровом канале испарителя (температуры насыщения пара T_S) и на его наружной стенке T_H , а также о перепаде температур между ними для оценки перегрева натрия при вскипании. Для этого во внутренней гильзе испарителя размещались две одинаковых хромель-алюмелевых термопары, которые служили для измерения абсолютного значения температуры насыщения T_S внутри испарителя ТТ. Одна из этих термопар использовалась для измерения перепада температур необходимого для фиксации начала кипения $T_{\text{НК}} = T_H - T_S$ и с этой целью она была дифференциально соединена с термопарой, размещенной в том же сечении на наружной стенке испарителя. Изолированный спай этого датчика температуры T_H был закреплен на ней полоской фольги, приваренной контактной сваркой. Ввиду использования метода прямого нагрева испарителя постоянным током спаи датчиков в гильзе были также изолированы тонкой кварцевой нитью с целью исключения влияния шагового напряжения на их показания. Увеличение величины измеряемого перепада температур при вскипании натрия и его стабилизация служили сигналом для отключения электрической нагрузки и выполнения измерений. Прецизионное определение измеряемых абсолютных значений и разностей температур в опытах выполнялось хромель-алюмелевыми термопарами согласно стандартной градуировке их термо э.д.с., которые соответственно измерялись с помощью цифровых вольтметров типа Щ68002 и Щ68003. В результате статистической обработки экспериментальных данных получены эмпирические зависимости $\Delta T_{\text{НК}} = f(T_S)$ и $\Delta T_{\text{НК}} = f(P_S)$, рис. 2-3.

Использование среднеарифметического метода усреднения дает такое описание результатов:

$$\Delta T_{\text{НК}} = 2,084224 \cdot 10^{-4} \cdot T_S^2 - 0,390421 \cdot T_S + 207,82218, \quad (1)$$

$$\Delta T_{\text{НК}} = 19,445 \cdot P_S^{-0,1553}. \quad (2)$$

Выводы

При проведении опытов впервые определены экспериментальные зависимости начала кипения натрия в затопленном объеме испарителя ТТ. При обработке результатов измерений использовались известные методы обработки и анализа опытных

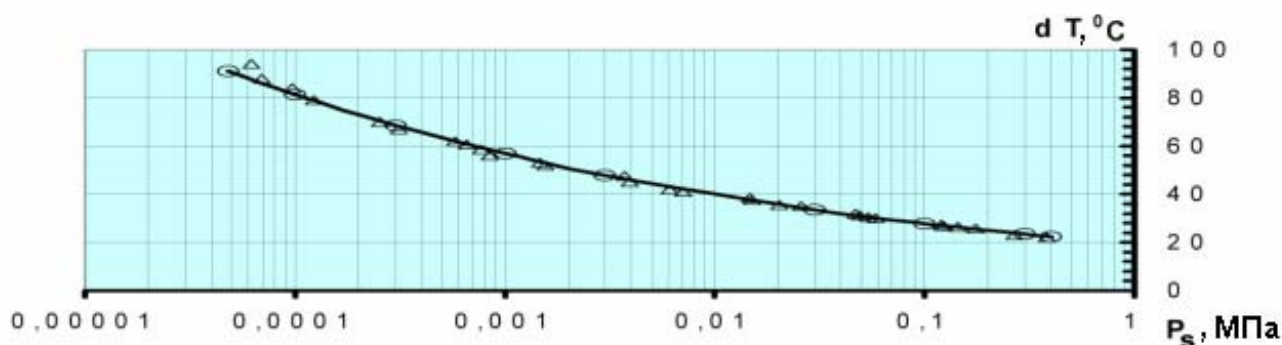


Рис. 2. Обработка экспериментальных данных по перегревам $\Delta T_{\text{НК}}$, необходимыми для начала вскипания натрия, от давления насыщения P_s , МПа. \circ – среднеарифметическое осреднение $\Delta T_{\text{НК}}$; \triangle – опытные данные $\Delta T_{\text{НК}}$.

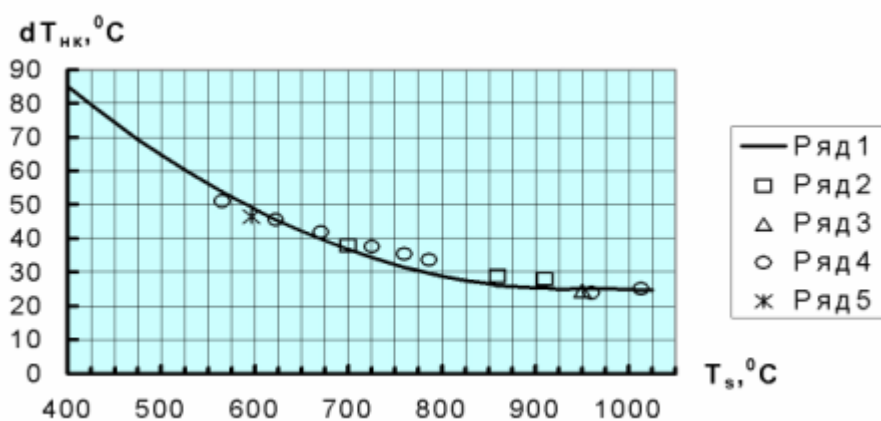


Рис. 3. Сопоставление усредненных опытных данных по $\Delta T_{\text{НК}}$ (ряд 1) с известными данными других авторов. Ряд 2 – данные В.И. Субботина и др. [3]; ряд 3 – данные М. Groll и др. [4]; ряд 4 – данные Sh. Aoki [5]; ряд 5 – данные А. Sakurai и др. [6].

данных. Определение достоверности полученных результатов базировалось на использовании стандартных методик. После завершения экспериментов были выполнены расчеты систематических погрешностей при прямых измерениях величин T_S и $\Delta T_{\text{НК}}$. Оценки величин допускаемых основных погрешностей $\Delta_{\text{доп}}$ составляют: при измерении перепада температур при вскипании натрия, $\Delta T_{\text{НК}}$ она равна $\Delta_{\text{доп}} = \pm 1,614 \%$, а при измерении температуры пара, T_S ее значение достигает величины $\Delta_{\text{доп}} = \pm 5,652 \%$.

Проведено сопоставление экспериментальных величин начала кипения $\Delta T_{\text{НК}}$ с известными ре-

зультатами опытов при кипении натрия в большом объеме [3–6]. На основе полученных в этой работе зависимостей (1)-(2): $\Delta T_{\text{НК}} = f(T_S)$ и $\Delta T_{\text{НК}} = f(P_s)$ весь массив сравниваемых опытных данных описывается с точностью $\pm 5 \%$.

Полученные результаты позволяют выполнять расчетные оценки $\Delta T_{\text{НК}}$ и предельной толщины пористого слоя в РИ необходимые при конструировании фитиля испарителя и определении допустимой величины плотности теплового потока q с целью предотвращения локального вскипания натрия и возможной деструкции фитиля в этой зоне.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Adkins D.R., Andraka C.E., Moss T.A.* "Development of a 75-kW Heat Pipe Receiver for Solar Heat-Engines" Proc. IX Int. Heat Pipe Conf. Albuquerque, 1995, P. 417-423.
2. *Шевчук Е.Н., Фиалко Н.М., Малецкая О.Е.* Разработка автономных энергоустановок с системой внешнего нагрева для утилизации теплоты высокотемпературных газов // Пром. теплотехника. – 2001. - Т. 23. - № 4-5. - С. 122-127.
3. *Субботин В.И., Сорokin Д.Н., Овечкин Д.М., Кудрявцев А.П.* Теплообмен при кипении металлов в условиях естественной конвекции. – М.: Наука, 1969. – 207 с.
4. *Groll M., Brost O., Mack H., Shevchuk E.N.* Evaporation heat transfer of sodium from capillary structures // Proc. 5 Intern. heat pipe conf.- Japan, Tsukuba - Inst. Space and Astronaut. Sci.- 1984. - P. 21-27.
5. *Aoki S.* Aspects of liquid-metal superheat and the effects on dynamics boiling. "Progress in heat and mass transfer", V. 7, 1973, P. 569-587.
6. *Sakurai A., et al.* "Bull.of the Inst. of Atom. Energy Kyoto University.", vol. 49, 1976. – P. 20.

Получено 09.10.2004 г.

УДК 531.7

МАРТЫНЕНКО М.П.

Ин-т технической теплофизики НАН Украины

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ ЖИДКОСТИ НА ВЫХОДЕ ИЗ КАМЕРЫ ПУЛЬСАТОРА МЕТОДОМ ВИЗУАЛИЗАЦИИ

Представлено експериментальні дані для прогину гумових мембран та визначено швидкості витікання середовища в пульсаторах камерного типу.

Представлены экспериментальные данные для прогиба резиновых мембран и определены скорости истечения среды в пульсаторах камерного типа.

Experimental data for rubber diaphragms flexure are presented. Fluid out-flow velocities in chamber mode pulse apparatus are determined.

A – амплитуда колебаний скорости, м/с;
 S – площадь поперечного сечения трубы пульсатора, м²;
 V – объем выталкиваемой или втягиваемой жидкости, м³;
 W – радиус прогиба мембраны, м;
 R – радиус мембраны, м;
 t – время, с;
 u – скорость движения жидкости в трубе пульсато-

ра, м/с;
 ω – частота колебаний скорости, Гц.
Индексы:

г – газ;
ж – жидкость;
к – камера;
0 – начальный;
м – мембрана.

Введение

Пульсаторы камерного типа используются для процессов экстрагирования в пищевой, фармакологической и др. промышленности [1,2]. Математические модели работы пульсаторов камерного типа приведены в [3-5], где рассчитаны дина-

мические характеристики камеры пульсатора, в том числе и скорости истечения из трубы. В [7] приведен расчет гидродинамики в реакторе пульсатора камерного типа, где предполагается, что профиль продольной скорости на выходе из трубы пульсатора камерного типа равномерный и изме-