УДК 620.92

ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКИЙ НАСОС С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НИЗКОПОТЕНЦИАЛЬНОЙ ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ

Е.В. Стариков, А.Д. Никитин, В.М. Пахалуев, С.Е. Щеклеин

ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»
РФ 620002, Екатеринбург, ул. Мира, д. 19
e-mail: aes@mail.ustu.ru

doi: 10.15518/isjaee.2015.10-11.009

Заключение совета рецензентов: 06.05.15 Заключение совета экспертов: 20.05.15 Принято к публикации: 03.06.15

Исследовано преобразование тепловой энергии в механическую работу по перекачиванию жидкости при парообразовании в узких вертикальных каналах. Особенностью вскипания жидкости в узких каналах является образование паровых снарядов, полностью перекрывающих поперечное сечение канала и выталкивающих из него жидкость. При этом возникает флуктуационный режим испарительно-конденсационных процессов при постоянном подводе тепловой энергии. Для описания данных процессов использована модель стержневого выброса. Проведены экспериментальные исследования изменения давления в канале при работе термомеханического насоса. Экспериментально определены зависимости расхода жидкости от ее температуры, подводимой мощности и напора. Разработана физическая модель работы насоса, построены его характеристики. Термомеханический насос может найти применение для повышения эффективности технологического процесса в тех областях техники, где необходимо перекачивание жидкости с относительно малым расходом и присутствует большое количество сбросной тепловой энергии.

Ключевые слова: термомеханический насос, паровые снаряды, перекачивание жидкости, преобразование тепловой энергии, использование низкопотенциальной энергии, парообразование, кипение в каналах.

THERMOMECHANICAL PUMP WITH THE USE OF LOW GRADE THERMAL ENERGY

E.V. Starikov, A.D. Nikitin, V.M. Pahaluev, S.E. Scheklein

Ural Federal University named after first President of Russia B. N. Yeltsin
19 Mir Str., Yekaterinburg, 620002 Russian Federation
e-mail: aes@mail.ustu.ru

Referred 6 May 2015 Received in revised form 20 May 2015 Accepted 3 June 2015

The paper investigates the transformation of thermal energy to mechanical work on pumping of liquid at steam formation in narrow vertical channels. Feature of boiling up of liquid in narrow channels is formation of the steam shells which are completely blocking the cross section of the channel and pushing out liquid from it. There is a fluctuation mode of vaporizing and condensation processes at a constant supply of thermal energy. The model of rod emission is used for the description of that processes.

This paper carries out the pilot studies of pressure variation in the channel during the operation of the mechanical heat pump and experimentally defines the dependences of flow rate of liquid on its temperature, the input power and pressure. The physical model of pump operation is developed, its characteristics are constructed. The thermomechanical pump can find application for increase of technological process efficiency in those areas of equipment where pumping of liquid with rather small expense is necessary and there is a large number of waste thermal energy.

Key words: mechanical heat pump, steam shells, pumping of liquids, thermal energy conversion, using of low potential energy, vaporization, boiling in the channels.

Стариков Евгений Владимирович
Evgeny V. Starikov

Сведения об авторе: канд. техн. наук, доцент кафедры «Атомные станции и возобновляемые источники энергии» Уральского федерального университета.

Образование: Уральский государственный технический университет (УГТУ-УПИ) (2004).

Область научных интересов: малая и нетрадиционная энергетика, энергетический анализ эффективности установок нетрадиционной энергетики, солнечная энергетика.

Награды и научные премии: призер всероссийских выставок и конференций, имеет грамоты.

Публикации: 32 статьи, 6 патентов на полезную модель,

Information about the author: PhD (engineering), associate professor of "Nuclear Power Plants and Renewable Energy Sources" department of Ural Federal University.

Education: Ural State Technical University (2004).

Research area: small-scale power engineering and alternative energy; energy efficiency analysis of alternative energy plants; solar power engineering.

Scientific awards: national exhibition prize winner, certificate of merit.

Publications: 32 articles, 6 patents.

Никитин Александр Дмитриевич
Alexandr D. Nikitin

Сведения об авторе: магистрант кафедры «Атомные станции и возобновляемые источники энергии» Уральского федерального университета.

Образование: Уральский федеральный университет (УрФУ) (2014).

Область научных интересов: малая и нетрадиционная энергетика, энергетический анализ эффективности установок нетрадиционной энергетики, солнечная энергетика, исследования теплофизических процессов в энергетике.

Награды и научные премии: победитель всероссийских выставок и конференций, имеет грамоты.

Публикации: 10.

Information about the author: MSc student, "Nuclear Power Plants and Renewable Energy Sources" department of Ural Federal University

Education: Ural Federal University (2014).

Research area: small-scale power engineering and alternative energy, energy efficiency analysis of alternative energy plants, solar power engineering, study of thermophysical processes in the energy sector.

Scientific awards: winner of the All-Russian exhibitions and conferences, certificate of merit.

Publications: 10.

Пахалуев Валерий Максимович
Valery M. Pahaluyev

Сведения об авторе: д-р техн. наук, профессор ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», кафедра «Атомные станции и возобновляемые источники энергии»; Действительный член Международной АН о природе и обществе.

Образование: Уральский политехнический институт (УГТУ-УПИ) (1961).

Награды и научные премии: Почетная грамота министерства энергетики и жилищно-коммунального хозяйства Свердловской области за многолетний добросовестный труд по подготовке кадров для энергетических предприятий страны (2011).

Область научных интересов: исследования теплофизических и физико-химических процессов в теплоэнергетике и металлургической теплотехнике, разработка физических основ нетрадиционных и возобновляемых источников энергии.

Публикации: более 90, в том числе 1 монография.

Information about the author: DSc (engineering), professor of Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin, "Nuclear Power Plants and Renewable Energy Sources" department; a member of International A.S. of Nature and Society.

Education: Ural State Technical University (1961).

Awards and scientific awards: certificate of merit of the Ministry of Energy and Housing and Utilities of the Sverdlovsk region for many years of hard work on the training for energy companies in the country (2011).

Research area: analysis of thermophysical and physical and chemical processes in thermoenergetics and metallurgy heat engineering; development of physical basis for the alternative and renewable power sources.

Publications: more than 90 scientific works, including 1 monograph.

Щеклеин Сергей Евгеньевич
Sergey Ye. Shcheclein

Сведения об авторе: д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Атомные станции и возобновляемые источники энергии» ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина».

Образование: Уральский политехнический институт (УГТУ-УПИ) (1972).

Награды и научные премии: Заслуженный энергетик Российской Федерации, действительный член Международной энергетической академии; национальная экологическая премия им. В.И. Вернадского; медаль «Ветеран атомной энергетики и промышленности».

Область научных интересов: термодинамика ядерных энергетических установок, проблемы атомной энергетики и теплофизики двухфазных потоков, продление ресурса и повышение надежности оборудования АЭС, солнечная энергетика, ветроэнергетика, биоэнергетика.

Публикации: более 350, в том числе 2 монографии, 20 изобретений.

Information about the author: DSc (engineering), professor, Head of "Nuclear Power Plants and Renewable Energy Sources" department of Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin.

Education: Ural State Technical University (1972).

Awards and scientific awards: Honored Power Engineer of the Russian Federation, Member of the International Energy Academy; National Environmental Prize V.I. Vernadsky; Medal "Veteran of Nuclear Energy and Industry".

Research area: nuclear power units thermodynamics; questions of nuclear energy and thermophysics of the two-phase flows; NPP equipment lifetime enduring and reliability increasing; solar and wind powers, and bioenergetics.

Publications: more than 350, including 2 monographs, 20 inventions.

Введение

Одним из направлений экономии топливно-энергетических ресурсов, наряду с повышением эффективности теплопередающих и теплогенерирующих установок, является разработка технологий использования низкопотенциальной энергии нетрадиционных и вторичных источников техногенного происхождения. Особый интерес представляет решение этой проблемы на основе движения теплоносителя в условиях генерирования паровых снарядов в каналах с непрерывным подводом теплоты. Преобразование энергии паровых снарядов, образующихся в узких каналах, непосредственно в механическую энергию позволяет обойтись без использования электромеханических побудителей движения жидкостей.

Закономерности роста парового пузыря внутри трубы привлекают внимание в связи с возникновением флуктуационного режима испарительно-конденсационных процессов при постоянном подводе тепловой энергии. Условием роста парового пузыря является наличие в нем внутреннего избыточного давления, связанного с перегревом жидкости по сравнению с температурой насыщения. Особенностью вскипания жидкости в узких каналах является образование паровых снарядов, полностью перекрывающих поперечное сечение канала и выталкивающих из него жидкость.

Энергию роста паровых снарядов и связанные с ними резкие периодические выбросы жидкости при вскипании в трубах малого диаметра можно преобразовать с помощью термомеханического насоса в полезную работу по перекачиванию жидкости.

Модель термомеханического насоса

Работа термомеханического насоса основана на периодическом образовании крупных паровых пузырей (снарядов). Если скорость роста пузыря при кипении в большом объеме со временем убывает, то при парообразовании в стесненных условиях, характеризующихся неразвитой естественной конвекцией, при подводе теплоты наблюдается непрерывное нарастание скорости роста паровой полости [1, 2]. Стесненные условия достигаются, в частности, при кипении в узких вертикальных трубах [3, 4].

Для оценки характеристик термомеханического насоса использована модель стержневого выброса [5]. Согласно модели, достаточно длинная вертикальная труба, заглушенная снизу, наполнена жидкостью до определенной высоты. В процессе нагрева жидкости образующаяся паровая фаза мгновенно заполняет все поперечное сечение канала, разрывая столб жидкости на два отдельных стержня. Пар в пузыре находится при температуре насыщения, и под действием избыточного давления паровой фазы выталкивается верхний столб жидкости. Движение столба жидкости описывается одномерным уравнением:

$$\frac{d^2 l}{d\tau^2} = \left(\frac{\Delta P}{\rho \cdot h} - g \right) - \left(\frac{\lambda}{2 \cdot d} + \frac{\xi}{2 \cdot h} \right) \cdot \left(\frac{dl}{d\tau} \right)^2, \quad (1)$$

где l – размер пузыря; ΔP – амплитуда импульса давления в канале при образовании пузыря; h – высота столба жидкости над пузырем; λ – коэффициент гидравлического трения движения жидкости; ξ – коэф-

коэффициент местного сопротивления обратного клапана; ρ – плотность жидкости; τ – время.

Скорость роста пузыря, как это следует из уравнения (1), определяется следующим образом:

$$\frac{dl}{d\tau} = m \cdot \frac{\exp(2 \cdot b \cdot m \cdot \tau) - 1}{\exp(2 \cdot b \cdot m \cdot \tau) + 1}, \quad (2)$$

где $m = \sqrt{\frac{a}{b}}$, $a = \frac{\Delta P}{\rho \cdot h} - g$, $b = \frac{\lambda}{2 \cdot d} + \frac{\xi}{2 \cdot h}$.

Значение расхода жидкости за один цикл продолжительностью τ_{Σ} , включающий образование пузыря, выталкивание и нагрев новой порции жидкости, поступающей через обратный клапан, можно оценить по приближенному выражению без учета потерь на трение при движении жидкости в канале:

$$G = 3,6 \cdot 10^6 \cdot \frac{S}{\tau_{\Sigma}} \cdot m \cdot [1 - \exp(-2 \cdot b \cdot m \cdot \tau)] \text{ л/ч}, \quad (3)$$

где S – площадь поперечного сечения канала; τ_{Σ} – время образования и роста пузыря в канале. Гидростатический столб воды h включает развиваемый напор H и часть высоты стеклянной трубки без учета нижнего испарительного участка.

Анализ экспериментальных данных

Схема экспериментальной установки для исследования термомеханического насоса изображена на рисунке 1.

Принцип действия термомеханического насоса состоит в следующем. При подводе теплоты к жидкости, находящейся в нижней части стеклянной трубки 7, образуются крупные пузыри пара. В момент образования пузыря давление в трубке повышается, датчик 10 регистрирует положительный перепад давления. Обратный клапан 6 открывается, и часть жидкости, равная объему образовавшегося пузыря, выталкивается в напорную линию. При этом впускной клапан 5 закрыт, препятствуя выходу жидкости в емкость 4. Так как плотность пара меньше плотности жидкости, то пузырь всплывает в верхнюю часть трубки, где происходит отвод теплоты через стенки трубки в окружающую среду и конденсация пара в пузыре. При этом давление снижается, что регистрируется датчиком 10. Выпускной клапан 6 закрывается, впускной клапан 5 открывается, и новая порция жидкости поступает в насос из емкости 4.

Рис. 1. Схема экспериментальной установки для исследования характеристик термомеханического насоса:

H – напор, создаваемый насосом; 1, 3 – термометры; 2 – мерная емкость с рисками; 4 – емкость с водой; 5, 6 – обратные клапаны; 7 – стеклянная трубка; 8 – спираль для нагрева; 9 – тепловая изоляция; 10 – датчик давления; 11 – вольтметр; 12 – амперметр; 13 – автотрансформатор

Fig. 1. Schematic of the experimental setup for the study of thermomechanical heat pump:

H – pump head; 1, 3 – thermometers; 2 – dimensional container of risk; 4 – water tank; 5, 6 – check valve; 7 – the glass tube; 8 – immersion heater; 9 – thermal insulation; 10 – pressure sensor; 11 – voltmeter; 12 – ammeter; 13 – autotransformer

При проведении испытаний насоса подвод теплоты осуществлялся за счет электронагрева спирали 8, обмотанной вокруг нижнего конца трубки. Подводимая электрическая мощность измерялась с помощью амперметра 12 и вольтметра 11. Для регулирования мощности применялся автотрансформатор 13. Температура жидкости измерялась термометрами 1 и 3. Напор, создаваемый насосом, соответствовал расстоянию между уровнем всасываемой жидкости и верхним изгибом напорной линии. Объем перекачиваемой жидкости G измерялся с помощью мерной емкости 2. В экспериментальной установке использовалась трубка с внутренним диаметром 12 мм, длиной 95 см, из которых 40 см составляет испаритель.

В ходе исследований термомеханического насоса анализировалась его работа при различных значениях напора, подводимой тепловой мощности и температуры воды на входе в насос. В качестве перекачиваемой жидкости использовалась недистиллированная вода.

Как видно на рис. 2, изменение давления внутри вертикального канала имеет флуктуационный характер, причем продолжительность цикла τ_{Σ} и значения импульсов давления ΔP зависят от подводимой тепловой мощности N , создаваемого напора H и температуры воды на входе в насос $t_{\text{вх}}$.

Рис. 2. Изменение давления при $N = 300$ Вт, $H = 15$ см вод. ст., $t_{вх} = 40^\circ\text{C}$

Fig. 2. Pressure variation in power 300 W, pump head 15 cm of water column and temperature at the pump inlet 40°C

На рис. 3 и рис. 4 приведены экспериментальные зависимости расхода перекачиваемой жидкости от температуры воды на входе в насос, подводимой мощности и напора. При расчете теоретических зависимостей (рис. 4) коэффициент обратного клапана

ξ принимался равным 1. Значение импульсов давления в канале ΔP , время роста пузыря τ и продолжительность цикла τ_Σ находились из соответствующих осциллограмм изменения давления во времени.

Рис. 3. Зависимость расхода от температуры воды на входе в насос при $N = 300$ Вт, $H = 50$ см вод. ст.

Fig. 3. Dependence of water flow from the temperature at the pump inlet, power 300 W, pump head 50 cm of water column

Рис. 4. Зависимость расхода воды от напора при различных подводимых мощностях
Fig. 4. Dependence of water flow from the pressure at different input power

Проведенные экспериментальные исследования термомеханического насоса показали его устойчивую работу. Особенностью термомеханического насоса является прямое преобразование тепловой энергии в работу по перекачиванию жидкости при надежности и простоте конструкции с отсутствием вращающихся механизмов. Недостатком является низкий коэффициент полезного действия из-за потерь на нагрев перекачиваемой воды и теплопередачи в окружающую среду. Увеличение эффективности насоса возможно за счет оптимизации его конструкции.

Так как термомеханический насос способен работать на низкокипящих жидкостях, можно найти ему применение в тех областях техники, где жидкость необходимо перекачивать с относительно малым расходом и присутствует большое количество сбросной тепловой энергии, что повышает эффективность технологического процесса [6].

Можно выделить следующие основные направления применения термомеханического насоса:

- в качестве циркуляционного насоса в системах отопления небольших домов (коттеджей), причем источником теплоты могут служить продукты сгорания отопительного котла;

- в системах охлаждения с использованием теплоты, отводимой от охлаждаемых элементов технологической установки;

- в холодильной технике в качестве резерва электромеханических перекачивающих насосов на работающих парокomppressorных и аммиачных холодильных установках [7].

Заключение

Особенностью парообразования жидкости в стесненных условиях, при которых не развивается естественная конвекция в каналах, является периодический перегрев и взрывной рост паровой фазы, что ведет к выталкиванию жидкости из канала. Энергию роста паровых снарядов и связанные с ними периодические выбросы жидкости можно преобразовывать в полезную работу по ее перекачиванию. Проведенные эксперименты показали, что расход перекачиваемой жидкости зависит от температуры воды, подводимой тепловой мощности и высоты уровней перекачиваемой жидкости. Термомеханический насос подобного типа может найти применение в технологических установках с большим количеством сбросной низкопотенциальной энергии.

Список литературы

1. Присняков В.Д. Рост паровых пробок в каналах малых диаметров // Инженерно-физический журнал. 1973. Т. XXV, № 3. С. 440–444.
2. Фисенко В.В. Критические двухфазные потоки. М.: Атомиздат. 1978. 160 с.
3. Щеклеин С.Е., Костомаров В.М. О механизме образования парового снаряда в узком канале без принудительной циркуляции // Теплофизика высоких температур. 1982. Т. 20, № 6. С. 1203–1205.
4. Пахалуев В.М., Стариков Е.В., Щеклеин С.Е. Автоколебательный процесс образования паровых снарядов при кипении бинарных жидкостей в стесненных условиях применительно к возобновляемым источникам энергии // Международный научный журнал "Альтернативная энергетика и экология" (ISJAE). 2012. № 4. С. 55–59.
5. Билеев Н.И., Казакова Л.Я., Лощин В.М. и др. Вскипание натрия в круглой трубе // Инженерно-физический журнал/ 1974. Т. XXVII, № 6. С. 957–963.
6. Ануфриев В.П., Черномуров Ф.М. Парожидкостный насос – теплообменник для добычи и транспортировки нефти за счет энергии попутного газа // Вестн. УГТУ-УПИ. 2005. № 5(57). С. 256–258.
7. Буй Мань Ту. Исследование теплогидравлических процессов в автоколебательных насосах теплового действия применительно к системам тепло- и хладоснабжения. Автореферат диссертации канд. техн. наук. М., 2010.

References

1. Prisnyakov V.D. Rost parovyh probok v kanalah malyh diametrov. *Inženerno-fizičeskij žurnal*, 1973, vol. XXV, no. 3. pp. 440–444 (in Russ.).
2. Fisenko V.V. Kritičeskie dvuhfaznye potoki. Moscow: Atomizdat Publ., 1978, 160 p. (in Russ.).
3. Scheklein S.E., Kostomarov V.M. O mehanizme obrazovaniâ parovogo snarâda v uzkom kanale bez prituditel'noj cirkulâcii. *Teplofizika vysokih temperatur*, 1982, vol. 20, no. 6, pp. 1203–1205 (in Russ.).
4. Pahaluev V.M., Starikov E.V., Scheklein S.E. Avtokolebatel'nyj process obrazovaniâ parovyh snarâdov pri kipenii binarnyh židkostej v stesnennyh usloviâh primenitel'no k vozobnovlâemym istočnikam ènergii. *International Scientific Journal "Al'ternativnââ ènergetika i èkologiâ" (ISJAE)*, 2012, no. 4, pp. 55–59 (in Russ.).
5. Buleev N.I., Kazakova L.Ya., Loschin V.M. et al. Vskipanie natriâ v krugloj trube. *Inženerno-fizičeskij žurnal*, 1974, vol. XXVII, no. 6. pp. 957–963 (in Russ.).
6. Anufriev V.P., Chernomurov F.M. Parožidkostnyj nasos – teploobmennik dlâ dobyči i transportirovki nefi za sčet ènergii poputnogo gaza. *Vestn. UGTU-UPI*, 2005, no. 5(57), pp. 256–258 (in Russ.).
7. Buj Man' Tu. Issledovanie teplogidravličeskikh processov v avtokolebatel'nyh nasosah teplovogo dejstviâ primenitel'no k sistemam teplo- i hladosnabženiâ. PhD thesis abstract (engineering). Moscow, 2010 (in Russ.).

Транслитерация по ISO 9:1995