

ТЕПЛОТДАЧА ПРИ ПАРООБРАЗОВАНИИ В ПОРИСТОЙ СТРУКТУРЕ В УСЛОВИЯХ БОЛЬШОГО ОБЪЕМА И КАПИЛЛЯРНОГО ТРАНСПОРТА ЖИДКОСТИ К ЗОНАМ ГЕНЕРАЦИИ ПАРА

А.В. ШАПОВАЛОВ

*Учреждение образования «Гомельский государственный
технический университет имени П.О. Сухого»,
Республика Беларусь*

Введение

Основной проблемой, определяющей развитие энергетической отрасли в Беларуси и странах СНГ, является проблема неэкономичного производства и использования энергии. Решение данного вопроса возможно за счет создания высокоэффективных теплотехнических агрегатов, применения оправданных инновационных способов передачи и трансформации энергии, наиболее полного использования вторичных энергоресурсов и возобновляемых источников энергии, обеспечения необходимого температурного уровня работы оборудования, снижения необратимых потерь теплоты. Одним из способов сокращения потерь от внешней необратимости тепловых процессов в теплообменниках является снижение температурных напоров между средами. Однако низкие температурные напоры приводят к уменьшению передаваемого теплового потока, увеличению весовых параметров и габаритных размеров оборудования.

Найти решение проблемы возможно путем изменения поверхностных условий теплообмена – развития теплоотдающей поверхности оребрением или нанесением различного рода покрытий, что особо оправдано в испарительных теплообменниках при использовании фазового перехода теплоносителя для обеспечения интенсивной теплопередачи. Наиболее эффективными в области низких температурных напоров являются медные капиллярно-пористые покрытия. Например, замена оребренных труб на трубы с медным металлизационным покрытием в кожухотрубных испарителях холодильных машин позволяет уменьшить в 1,5–2 раза габаритные размеры аппаратов, массу кожуха и крышек [1].

Дополнительная экономия может быть получена за счет замены и уменьшения количества рабочей жидкости, необходимой для заправки оборудования. В качестве альтернативы хладагентам испарительного оборудования холодильной техники химической промышленности рассматривают углеводороды, как перспективные, однако недостаточно изученные рабочие жидкости. Пропан обладает схожими термодинамическими свойствами, по сравнению с фреонами, не токсичен и инертен к металлам, является диэлектриком.

Значения коэффициентов теплоотдачи при парообразовании в капиллярно-пористой структуре зависят как от ее свойств (материала покрытия, пористости, толщины, размера фракции, проницаемости), так и от ряда условий работы (давления насыщения, физических и теплофизических свойств жидкости, уровня жидкости над теплоотдающей поверхностью, степени погружения структуры в жидкость). Поэтому для разработки энергетической аппаратуры, отвечающей современным требованиям, необходимо детально изучить условия работы развитой теплоотдающей поверхности.

Экспериментальные исследования теплоотдачи при парообразовании на затопленной и частично затопленной медной спеченной капиллярно-пористой структуре в условиях свободного объема и ограниченного пространства представляют несомненный интерес.

Экспериментальная установка и опытное оборудование

В лаборатории пористых сред ГНУ «Институт тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова» НАН Беларуси проведена серия экспериментов по исследованию теплообмена при парообразовании пропана на трубах, покрытых медными спеченными капиллярно-пористыми структурами. Опыты проводились на экспериментальной установке, схема которой приведена на рис. 1.

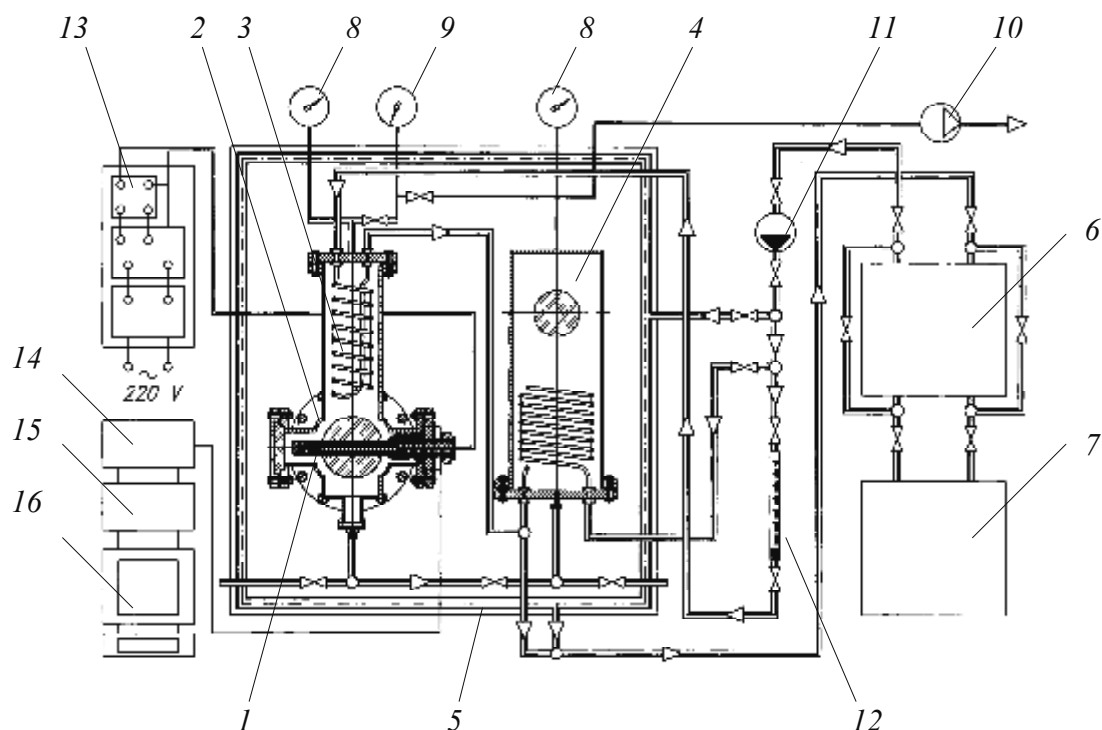


Рис. 1. Экспериментальная установка

Процесс кипения рабочей жидкости на экспериментальном образце 1 осуществляется в кипятильной камере 2 из нержавеющей стали, в объем которой вмонтирован конденсатор 3 для поддержания постоянных параметров насыщения. Экспериментальный образец крепится на штативе, размещенном в центральной части кипятильной камеры с помощью фланцевого соединения. Тепловой поток к образцу подводится от электрического нагревателя, расположенного внутри медной цилиндрической оболочки штатива. Фланец штатива снабжен сальником для вывода термопар. Для замены рабочей жидкости, монтажа и заполнения кипятильной камеры предусмотрена вспомогательная камера 4 со встроенной системой охлаждения. Для поддержания адиабатных условий при проведении экспериментов кипятильная и вспомогательная камеры помещены в климатический бокс 5, температура в котором поддерживается равной температуре насыщения рабочей жидкости в кипятильной камере при помощи контуров нагрева (термостаты 6) и охлаждения (холодильные машины 7). Контур охлаждения и нагрева снабжены погружным жидкостным насосом 11 и ротаметром 12. Кипятильная камера подключается к системе вакуумирования, состоящей из вакуумметра 9 и вакуумного насоса 10.

Нагреватель рабочего участка запитан от сети 220 В. Электроизмерительная система нагревателя 13 состоит из стабилизатора напряжения С-05, лабораторного автотрансформатора РНО-250, выпрямителя тока ВСА-5А, вольтамперметров М1108.

Для измерения температуры используются медь-константановые термопары с толщиной проводников 0,12 мм. Сбор и обработка информации производится автоматизированным комплексом, в состав которого входит коммутатор измерительных сигналов Ф7078К 14, электронный цифровой вольтметр Щ68000 15 и ПЭВМ 16. Более подробное описание экспериментальной установки и методики проведения исследований представлено в [2]. Опытными образцами служили горизонтальные медные трубы длиной 100 мм, с внешним диаметром 20 мм и толщиной стенок 2 мм. На поверхность теплообмена напекалось пористое покрытие из порошка меди ПМС-Н. Для определения структурных свойств пористых покрытий и проницаемости в лаборатории пористых сред были проведены соответствующие эксперименты. Свойства капиллярно-пористых структур сведены в таблицу.

Структурные свойства и проницаемость пористых покрытий

Д, мм	Размер частиц, мкм	d_M , мкм	r_{EF} , мкм	$K \times 10^{-11}$, м ²	d_0 , мкм	ε
0,3	-63÷100	75,38	20,79	1,5	34,37	0,5÷0,55
0,6						
0,8						

Примечание. δ – толщина капиллярно-пористой структуры; d_M – средневзвешенный диаметр частиц фракции; r_{EF} – эффективный радиус поры; K – газовая проницаемость структуры; d_0 – средний гидравлический диаметр поры; ε – открытая пористость.

Эксперименты проводились при температуре насыщения $T_H = 20$ °С, давлении $p_H = 8,4$ бар = $8,4 \cdot 10^5$ Па ($p^* = 0,197$), в диапазоне тепловых нагрузок $q = (0,03 \div 80)$ кВт/м². Высота уровня жидкости h измерялась относительно нижней образующей трубы и менялась от 0 до 80 мм. В ряде опытов труба помещалась между двумя горизонтальными пластинами из прозрачного материала и в горизонтальный кольцевой канал из стекла таким образом, чтобы зазор между внешней границей пористой структуры и прозрачной поверхностью составлял 1,5–2 мм (рис. 2).

Перед началом исследования были проведены тарировочные опыты на гладкой медной трубе. Полученные результаты удовлетворительно согласуются с данными, опубликованными в литературе [3], [4].

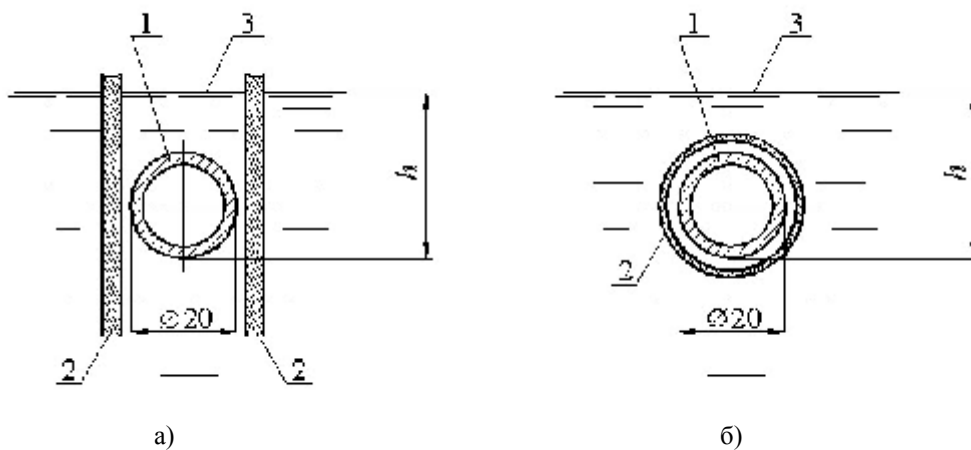


Рис. 2. Размещение трубы с пористым покрытием: *a* – между вертикальными пластинами; *b* – в горизонтальном кольцевом зазоре: 1 – труба с пористым покрытием; 2 – прозрачная ограничивающая стенка; 3 – уровень жидкости относительно нижней образующей

Результаты экспериментов и их обсуждение

На рис. 3 представлены данные, полученные для частично затопленной структуры ($h = 15; 10; 5$ мм), толщиной $\delta = 0,3$ мм в свободном объеме. Схожие закономерности между изменениями коэффициента теплоотдачи и плотностью теплового потока фиксировались и для структур толщиной $\delta = 0,6$ и $0,8$ мм. При значении $h = 20$ мм жидкость полностью покрывала структуру, уровень жидкости устанавливался по верхней образующей трубы. Для сопоставления данных на графике показана характеристика теплоотдачи полностью затопленной структуры ($h = 80$ мм) при наличии слоя жидкости $h' = 60$ мм над верхней образующей образца.

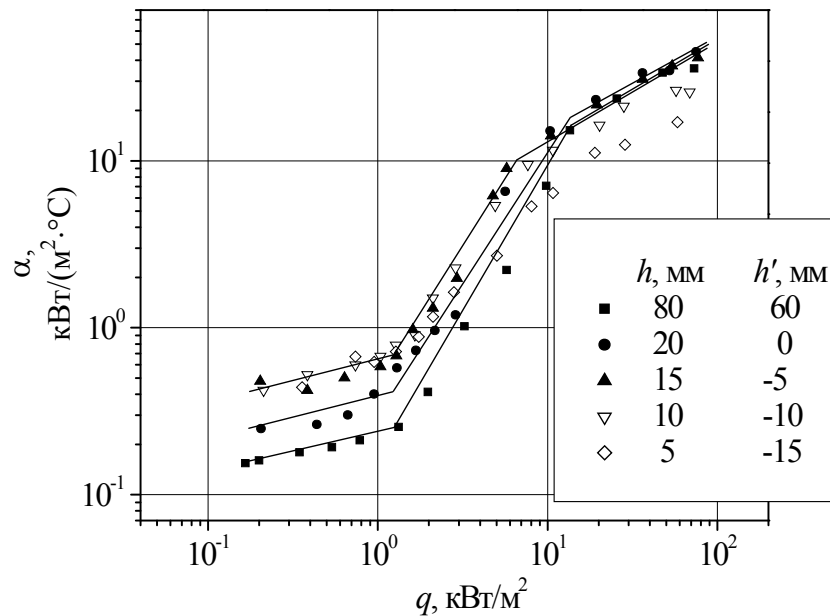


Рис. 3. Характеристики процесса парообразования для частично затопленной капиллярно-пористой структуры при толщине пористого покрытия $\delta = 0,3$ мм

В области невысоких тепловых нагрузок ($q < 5$ кВт/м²) понижение уровня жидкости относительно верхней образующей трубы на четверть и половину диаметра ($h = 15$ мм) способствовало увеличению среднего по теплоотдающей поверхности коэффициента теплоотдачи. Повышение интенсивности теплообмена наблюдалось для трех структур разной толщины. Измерения температурных напоров показали, что это происходило за счет уменьшения перегрева стенки на незатопленной части образца, куда жидкость поступала за счет действия капиллярных сил. При величинах $q = 0,1 \div 5$ кВт/м² наблюдалось повышение коэффициентов теплоотдачи в 1,5 раза при высоте слоя жидкости на уровне верхней образующей образца ($h = 20$ мм), в 2,5–3 раза при уровнях жидкости ниже верхней образующей на четверть и половину диаметра трубы ($h = 15; 10$ мм). Для частично затопленных капиллярно-пористых структур разной толщины первые паровые пузыри очень маленького диаметра $d \sim 0,1$ мм генерировались с высокой частотой по линии касания жидкости пористого тела, фиксировались при более низких значениях осредненного перегрева стенки ΔT , по сравнению с процессом теплообмена для структур в объеме жидкости.

Для тепловых нагрузок ($q > 10$ кВт/м²) коэффициенты теплоотдачи были сравнимы с α полностью залитых структур только при уровнях жидкости $h = 20; 15$ мм. Снижение уровня до половины диаметра трубы и ниже ($h = 10; 5$ мм) отрицательно сказывалось на интенсивности теплоотдачи при тепловых нагрузках выше 10 кВт/м². Это связано с

ростом перегрева незатопленной поверхности вследствие осушения капилляров, подводящих жидкость к местам парообразования. По медленному росту температуры верхней образующей стенки в условиях стационарного режима фиксировалось наступление капиллярного кризиса теплоотдачи. При достижении $\Delta T = 10$ °С эксперимент прекращался с целью предупреждения замыкания на обмотке нагревателя. На незатопленной поверхности структур в отдельных местах наблюдались скопления паровых пузырей в виде пятен пены, которые мгновенно испарялись.

Экспериментальные данные показывают, что в исследуемом интервале изменения плотности теплового потока для покрытий разной толщины существует оптимальная степень погружения структур, при которой уровень жидкости ниже верхней образующей трубы на четверть диаметра ($h = 15$ мм). При таком значении h фиксировалась высокая интенсивность теплообмена для низких тепловых нагрузок, в области высоких плотностей теплового потока коэффициенты теплоотдачи были сравнимы с α затопленных структур. В области низких тепловых нагрузок (до значения $q \sim 7$ кВт/м²) более высокие коэффициенты теплоотдачи получены для структуры толщиной $\delta = 0,8$ мм, осредненный перегрев стенки в этом случае слабо зависит от подводимого теплового потока. Для высоких значений q интенсивность теплообмена в такой структуре резко снижается. При $q = 60$ кВт/м² отношение $\alpha_{0,3} / \alpha_{0,8} \sim 1,8 \div 2$. Покрытия толщиной $\delta = 0,6$ мм и $0,8$ мм имеют более развитую систему внутривязанных капилляров, подводящих жидкость, большее число локальных центров испарения по внутреннему объему структуры. Заполнение паром внутренних полостей «толстых» структур на высоких тепловых нагрузках ведет к снижению эквивалентной теплопроводности покрытия, росту перегрева стенки и понижению коэффициентов теплоотдачи.

В соответствии с моделями кипения на пористых покрытиях [5]–[9], поверхности паровых каналов постоянно смочены пленкой жидкости, ухудшающей условия для выхода пара. Возможно предположить, что пленка жидкости в макропорах будет отсутствовать. Во время подвода тепла, часть тепловой нагрузки идет на организацию парообразования внутри пористого слоя, часть передается жидкости, омывающей затопленную поверхность покрытия, через смоченный скелет структуры. В объеме пористого слоя нагрев поступающей в капилляры жидкости происходит в условиях весьма высокой интенсивности теплообмена. При малых диаметрах капилляров движение жидкости в них всегда ламинарное. В условиях развитой поверхности покрытия только за счет подогрева жидкости от стенки отводятся большие тепловые потоки. При отсутствии пленки жидкости в макропорах незатопленного участка определяющим процессом теплообмена в этой части структуры будет процесс испарения в объеме открытых пор. Основным стоком тепла в этом случае являются поверхности менисков, образованных в местах примыкания жидкостных капилляров к открытым порам. Совместное существование процессов испарения и нагрева жидкости в капиллярах приводит к существенной интенсификации теплоотдачи при низких плотностях подводимого теплового потока. Высокая интенсивность теплообмена для частично залитых структур при небольших q подтверждена опытными данными, что качественно отражает представленную схему парообразования при капиллярной подаче жидкости.

Авторы ряда опубликованных работ отмечали, что наличие ограничивающих стенок усиливает теплоотдачу свободной конвекцией от горизонтального нагретого цилиндра либо системы таких цилиндров [10], [11]. Для получения данных о влиянии условий ограничения пространства вокруг развитой теплоотдающей поверхности при фазовом переходе были проведены эксперименты, при которых труба с покрытием помещалась между двумя вертикальными пластинами и в горизонтальный кольцевой канал. Результаты представлены на рис. 4.

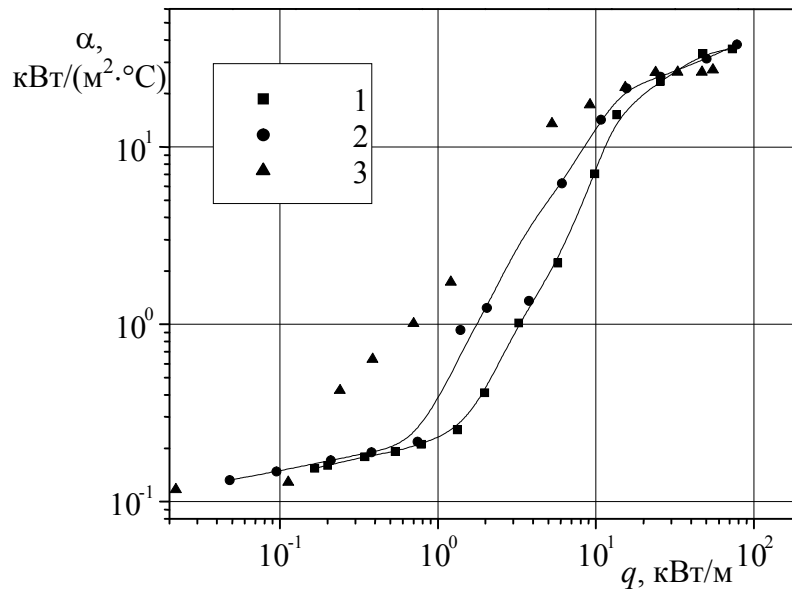


Рис. 4. Сопоставление опытных данных при организации парообразования на капиллярно-пористой структуре толщиной $\delta = 0,3$ мм в свободном объеме 1 и в условиях вертикального прямоугольного канала 2 и горизонтального кольцевого зазора 3. Высота уровня жидкости $h = 80$ мм

Опытные данные показывают, что наличие ограничивающего пространства у внешней поверхности пористой структуры в большом объеме оказывает влияние на интенсивность теплоотдачи до тепловых нагрузок ~ 20 кВт/м². Более раннее появление первых паровых пузырей и некоторое увеличение коэффициентов теплоотдачи наблюдалось при снижении высоты слоя жидкости до уровня верхней образующей трубы ($h = 20$ мм). В этих условиях при наличии ограничивающих пластин температурные напоры $\Delta T = T_{ст} - T_{ж}$, соответствующие выходу на поверхность первых пузырей, были меньше, чем в опытах без пластин. Измерения показали, что средние перегревы снижались за счет уменьшения температуры на боковых образующих поверхности трубы в случае вертикального прямоугольного канала, и понижения температуры верхней образующей – при помещении трубы в горизонтальный кольцевой канал.

Возможной причиной повышения интенсивности теплообмена могло являться перемешивание жидкости проходящими через зазор пузырями, в результате которого место перегретой жидкости у поверхности образца занимала жидкость при температуре насыщения. Авторы работ [12], [13], исследовавшие теплообмен при парообразовании в стесненных условиях, предполагают, что скользящие вдоль теплоотдающей поверхности пузыри формируют перегретый микрослой на поверхности нагрева, который быстро испаряется, обеспечивая высокие локальные коэффициенты теплообмена. При повышении тепловой нагрузки мелкие паровые пузырьки сливались в крупные, заполняли зазор и скользили вдоль поверхности нагрева. Пузыри, образующиеся на боковых поверхностях трубы, сливались с пузырями, всплывавшими снизу, образовывали скопления, прохождение которых через узкий зазор было затруднено.

Выводы

При испарении в капиллярно-пористом покрытии частично затопленной горизонтальной цилиндрической поверхности в условиях малых тепловых нагрузок коэффициенты теплоотдачи могут быть в 2–3 раза выше, чем при парообразовании в большом объеме.

Условия ограничения пространства способствуют интенсификации теплоотдачи при парообразовании в медных спеченных капиллярно-пористых структурах для соотношения $\delta/d_m < 8$, вследствие изменения гидродинамики парожидкостного потока, омывающего

структуру. Теплообмен при парообразовании в пористых покрытиях большей толщины определяется преимущественно интенсивными процессами внутривыводного испарения.

Учет полученных данных может быть полезен при проектировании теплообменного оборудования испарительного типа.

Литература

1. Интенсификация теплообмена во фреоновых кожухотрубных испарителях путем применения труб с металлизационным покрытием /В.А. Гоголин [и др.] //Холодильная техника. – 1979. – № 1. – С. 26-31.
2. Васильев, Л.Л. Интенсификация теплообмена при кипении пропана на горизонтальных трубах /Л.Л. Васильев, В.В. Хроленок, А.С. Журавлёв //Тепло- и массоперенос – 97: сб. науч. тр. – Минск: АНК ИТМО им. А.В. Лыкова НАНБ. – 1997. – С. 9-14.
3. Клименко, А.П. Экспериментальное исследование теплообмена при кипении пропана /А.П. Клименко, В.И. Козицкий //Нефтяная и газовая промышленность. – 1967. – № 1. – С. 40-43.
4. Pool boiling heat transfer from GEWA-T-x finned tube to propane and propylene /D. Gorenflo, P. Blein, W. Rott et al. //Advanced in Pool Boiling Heat Transfer: Eurotherm No. 8. Proc. of Int. Seminar, Paderborn, F.R.G., 1989. P. 116-126.
5. Модель процесса концентрирования при кипении в капиллярно-пористых структурах /В.С. Полонский [и др.] //Доклады АН СССР. – 1978. – Т. 241, № 3. – С. 579-583.
6. Ковалев, С.А. Испарение и конденсация в тепловых трубах /С.А. Ковалев, С.Л. Соловьев. – М.: Наука, 1989. – 112 с.
7. Webb R.L. Nucleate boiling on porous coated surfaces //Heat Transfer Engineering. V. 4. Nos. 3-4. 1983. P. 71-82.
8. Smirnov H.F. Afanasiev B.A., Poniewski M.E. Boiling in capillary-porous structures //Proc. Int. Conf. Heat Transfer with Change of Phase, Kielce, Poland. Part II. 1996. P. 197-220.
9. Shaubach R.M., Dussinger P.M., Bogart J.E. Boiling in heat pipe evaporator wick structures //Proc. 7th Int. Heat Pipe Conf., Minsk, Belarus. 1990. P. 1-15.
10. Yaghoubi M.A., Incropera F.P. Natural convection from a heated horizontal cylinder submerged in a shallow water layer //Heat Transfer 1978. Proc. of 6th Int. Heat Transfer Conf., Toronto, Canada, 1978. V. 2. P. 269-274.
11. Инкропера, Ф. Свободноконвективная теплоотдача от нагретых цилиндров, погруженных в мелководный слой /Ф. Инкропера, М. Ягуби //Теплопередача. – 1979. – Т. 101, № 4. – С. 209-211.
12. Cornwell K. The influence of bubble flow on boiling from a tube in a bundle //Int. J. Heat Mass Transfer. 1990. V. 33. P. 2579-2584.
13. Fujita Y., Ohta H., Uchida S., Nishikawa K. Nucleate boiling heat transfer and critical heat flux in narrow space between rectangular surfaces //Int. J. Heat Mass Transfer. 1989. V. 31. P. 229-239.

Получено 17.02.2005 г.