

**УСТРОЙСТВА ДЛЯ УТИЛИЗАЦИИ
НИЗКОПОТЕНЦИАЛЬНЫХ ТЕПЛОВЫХ РЕСУРСОВ****АННОТАЦИЯ**

На основе экспериментальных исследований и расчетно-теоретических оценок механизмов теплопереноса в тепловых трубах (ТТ) обосновывается концепция построения новых принципиальных схем для утилизации низкопотенциальных тепловых ресурсов естественной среды и ноосферы. Изменение схем парожидкостного тракта, конструкции фитилей в зонах испарения и конденсации приводит к появлению новых теплофизических свойств и потребительских качеств ТТ. Рассматриваются области применения разрабатываемых устройств для решения задач утилизации низкопотенциального тепла.

1. ВВЕДЕНИЕ

Максимально достижимый теплоперенос в ТТ рассчитывается по упрощенным моделям, не учитывающим процессы гетерогенно-гомогенной объемной конденсации в паровом потоке. Недостаточно изучено влияние процессов вдува-отсоса на гидродинамику течения влажного пара, влияние неконденсируемых газов (НКГ) на гидродинамику и теплообмен в торце конденсатора. Практически отсутствуют работы по исследованию процессов запуска ТТ из замороженного состояния теплоносителя. Большинство экспериментальных работ по исследованию теплопереноса в ТТ основано на применении термопарных измерений температуры стенок зон теплообмена, что значительно ограничивает объем полученной информации. Для моделирования процессов запуска высокотемпературных ТТ (теплоноситель – натрий) нами была разработана и осуществлена методика экспериментального исследования состояния парового потока с помощью оптических средств контроля на основе приборов: интерферометра Маха-Цендера, теневого прибора Теплера, лазерного оптического светового «ножа». Выявлены механизмы переноса тепла, массы и импульса в плоском канале низкотемпературной ТТ. Основные результаты проведенных экспериментов опубликованы в [1-2, 4]. Показано, что увеличение удельных тепловых нагрузок усиливает роль процессов объемной конденсации на теплоперенос, а процессы вдува-отсоса формируют устойчивые вихревые структуры в

зонах испарения и конденсации. Основной перенос массы и импульса парокapельного потока происходит в пределах границ вихревых структур. Движение капель, происходящее в поле аэродинамических и гравитационных сил, приводит к неравномерному расходу конденсированной фазы на теплообменные поверхности конденсатора. Интенсификация теплопереноса может быть успешно решена только при условии учета всей совокупности факторов, влияющих на максимально достижимый теплоперенос. В [4] обоснован термодинамический подход к проблеме интенсификации теплопереноса на основе понятия эксергии (часть тепла, которую можно использовать для получения механической работы). В [5,6] предлагается изменить схему парожидкостного тракта для получения холодильного эффекта. Однако, эти предложения не исчерпывают все возможности построения новых принципиальных схем ТТ, обладающих высокими теплофизическими характеристиками и потребительскими качествами. Последовательный и по возможности более полный учет всех механизмов теплопереноса в ТТ лежит в основе построения новых высокоэффективных устройств для утилизации низкопотенциального тепла.

**2. МЕХАНИЗМЫ ТЕПЛОПЕРЕНОСА, НЕ
УЧИТЫВАЕМЫЕ В РАСЧЕТНЫХ
МОДЕЛЯХ****2.1. Гидродинамика парового потока**

Оптические средства контроля состояния парового потока не искажают рабочий процесс в ТТ. Интерферограммы течения пара в плоской низкотемпературной ТТ (ацетон) выявили распределение плотности и степени пересыщения (рис. 1) пара в поперечных сечениях, теневой метод - ядро потока, фотографии - капли и их треки [1-2]. Изучение треков капель в испарителе (при $q_{\text{н}} \approx 1$ Вт/см²) выявило существование устойчивых поперечных вихрей (Y-валы) с размерами $\sim 1/3$ поперечного сечения канала. Визуализировалось петлеобразное движение ядра потока вдоль испарителя в пределах границ вихревых структур. В конденсаторе были обнаружены продольные вихри (X-валы). В торце конденсатора визуализировалась обширная зона крупномасштабного вихревого течения, вдоль

границ которой происходил основной массоперенос (результат совместного изучения теневых снимков и фотографий треков частиц). Треки каплей, по мере уменьшения скорости ядра потока, показали выпадение их на нижнюю теплообменную поверхность конденсатора. Неравномерный расход конденсированной фазы на поверхности испарителя отразился в результатах обработки интерферограмм (рис.2).

2.2. Структура парового потока

В большинстве работ принимается модель равновесного парового потока, замороженного по отношению к фазовым переходам. Реальная картина не подтверждается экспериментом. Интерферограммы позволили определить распределение степени пересыщения пара в поперечных сечениях плоской ТТ [2]. Метод светового «ножа» выявил наличие жидкой фазы в потоке. По количеству и размеру капель оценивалась сухость пара x_0 и влажность $(1 - x_0)$. Формировалось ядро потока, на оси которого влажность и степень пересыщения возрастали по ходу потока

Процесс теплопереноса в ТТ необходимо рассматривать как ряд последовательно реализующихся метастабильных состояний парового потока, при которых возможно появление новых устойчивых фаз, соответствующих $r_{кр}$. Фазы, для которых $r < r_{кр}$, являются неустойчивыми и в процессе теплопереноса разрушаются. Образование новой фазы может происходить на готовых зародышах-ядрах, внесенных в объем парового потока, например, каплям теплоносителя, выброшенных при испарении из фитильной структуры. Такой процесс в соответствии с определением в [2,3] называется гетерогенной объемной конденсацией, рис.1. При отсутствии посторонних ядер, когда центры конденсации образуются непосредственно в пересыщенном паре в результате гетерофазных флуктуаций, наблюдается гомогенная объемная конденсация [3].



Рис.1. Визуализация паракапельного потока в ТТ методом световой «нож». Режим $Re = 460$, $Re_r = 30$

Выявленные в эксперименте градиенты оптической неоднородности (рис. 2) отражают процессы вдува-отсоса на теплообменных поверхностях.

2.3. Влияние полей массовых сил

Капиллярный потенциал фитиля gh_k , как правило, меньше гравитационного gh_r и

недостаточен для подъема жидкости на высоту ТТ. Вращение вокруг оси создает поле центробежных сил, которое при соответствующем профилировании канала вызывает появление центробежного ускорения $\omega^2 R$, компенсирующего гравитационное.

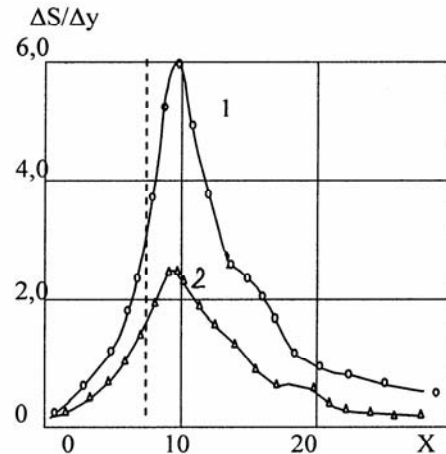


Рис. 2. Оценка теплообмена в ТТ. Изменение градиентов оптических неоднородностей вдоль фитиля ТТ; 1 - $y = 0$, 2 - $y = 1$; выход их испарителя $x = 7,6$. Режим $Re = 460$, $Re_r = 30$. $\Delta S/\Delta y$, 1/мм.

При вертикальном расположении оси ТТ можно полностью скомпенсировать гравитационные силы по условию $g \cos \alpha = \omega^2 R \sin \alpha$, где α - угол наклона стенки к оси. При горизонтальном положении вращение ТТ вызовет появление массовых сил, создающих дополнительный к капиллярному движущий перепад давления. Экспериментальные исследования влияния вращения ТТ на теплообмен выявили увеличение коэффициентов испарения и конденсации. Появляется сепарационный эффект, способствующий удалению капель жидкой фазы из парового потока и равномерному расходу конденсированной фазы на теплообменные поверхности конденсатора. Уменьшается гидростатический перегрев теплоносителя, облегчается его дегазация. Кроме того, интенсифицируется внешний теплообмен на ребренных поверхностях испарителя и конденсатора.

2.4. Роль бинарных смесей для получения новых теплофизических свойств ТТ

Бинарные смеси, состоящие из хладагента и абсорбента, позволяют получить холодильный эффект в ТТ [6]. Хладагентом могут быть: аммиак, метиламин, вода и др. Для каждого из них в качестве абсорбента могут быть выбраны соответственно: вода, хлористый литий, бромистый литий.

Новые теплофизические свойства ТТ можно получить на основе следующих решений:

- пароструйной холодильной машины [5];
- абсорбционной холодильной машины непрерывного действия.

Энергетически более выгоден второй вариант. Бинарные смеси для таких машин имеют следующие особенности:

- 1) при кипении раствора пары состоят, главным образом, из легкокипящего агента;
- 2) теплый жидкий раствор абсорбирует пары легкокипящего агента с более низкой температурой при том же давлении.

Термодинамическое равновесие растворов вытекает из первого закона Коновалова, согласно которому при постоянной температуре раствора давление пара увеличивается с возрастанием концентрации того компонента, который содержится в большем количестве в паровой фазе. По своей теплофизической природе ТТ идеально подходит для данного решения.

Роль насоса жидкой фазы в этом случае выполняют:

- капиллярные силы фитиля;
- эксергетические ресурсы парового потока;
- массовые силы от гравитационного поля и поля центробежных сил.

3. РЕШЕНИЕ ПРОБЛЕМ УТИЛИЗАЦИИ НИЗКОПОТЕНЦИАЛЬНЫХ ТЕПЛОВЫХ РЕСУРСОВ

Все известные к настоящему времени низкопотенциальные тепловые ресурсы можно представить как совокупность двух категорий:

- 1 низкопотенциальные тепловые ресурсы естественной среды;
- 2 низкопотенциальные тепловые ресурсы ноосферы [5].

По Вернадскому под ноосферой подразумевается часть среды, преобразованной человеком. Выделим из ТР самые распространенные и значительные по суммарному тепловому эквиваленту. Из них, в первую очередь, следует выделить суммарный охлаждающий импульс атмосферного воздуха; во вторую - ТР выхлопных газов автомобильного транспорта. Утилизировать выделенные ТР можно с помощью предлагаемых далее технических решений.

3.1. Концепция построения новых устройств для утилизации тепловых ресурсов

ИКТ представляет собой термодинамически неравновесную систему.

Рост удельных тепловых нагрузок сопровождается вторжением теплоносителя вглубь области метастабильного состояния. При этом усиливается роль процессов гомогенной нуклеации (флуктуационного происхождения), которые обеспечивают протекание таких динамических явлений как взрывообразное вскипание теплоносителя, неустойчивость

межфазных границ, спонтанную гомогенно-гетерогенную объемную конденсацию в паровом потоке. Негативное влияние этих процессов можно значительно ослабить изменением схемы парожидкостного тракта, конструкции фитилей, воздействием на рабочую среду полями различной физической природы.

Концепция построения новых принципиальных схем устройств для утилизации низкопотенциальных тепловых ресурсов заключается в выполнении следующих условий:

- 1 организация спутных струй пара и жидкого теплоносителя во всех зонах теплообмена;
- 2 использование эксергетических ресурсов парового потока в конденсаторе для преобразования кинетической энергии пара в дополнительный, к капиллярному, движущий перепад давления в жидкости за счет влияния касательных напряжений на межфазной поверхности в открытых капиллярных канавках;
- 3 использование полей массовых сил от гравитации и от вращения устройства вокруг оси для получения дополнительного, к капиллярному, движущего перепада давления в жидкости;
- 4 введение в паровой тракт бинарных смесей для получения цикла абсорбционной холодильной машины;
- 5 использование влияния электрических полей на интенсификацию процессов тепло- и массообмена в конденсаторе;
- 6 применение конструкции фитиля по принципу обратно-менискового испарения.

3.2. Принципиальные схемы новых устройств

На рис. 3 представлена схема ИКТ со спутным движением пара и жидкого теплоносителя. Преимущество данной схемы от ТС и ТТ традиционных схем заключается в автоматической перестройке режима работы: от кипения в ТС к испарению из фитиля в ТТ. Накопление жидкости над пористым гидрозатвором создает дополнительный к капиллярному движущий перепад давления и обеспечивает переход ИКТ в режим более высокого удельного теплопереноса. Такие устройства целесообразно использовать для замораживания грунта с целью упрочнения массива земляных дамб, или накопления холода в складах – холодильниках.

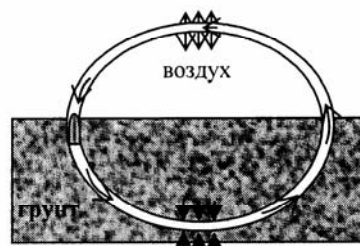


Рис.3. Принципиальная схема ИКТ со спутным течением пара и жидкости.

Принцип построения пароструйной холодильной машины на основе ТТ защищен патентом РФ и описан в [5-7], рис.4.

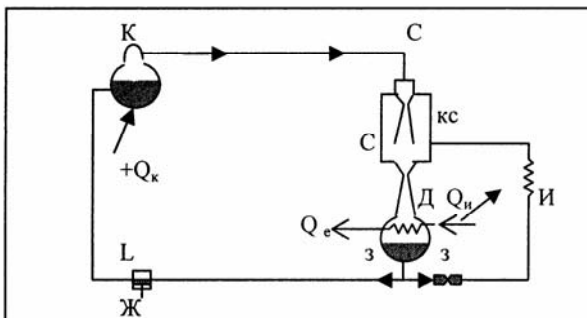


Рис.4. Принципиальная схема термодинамического расчета пароструйной тепловой трубы с холодильным эффектом ТТХЭ.
 К – котел, С – сопло, К/С – камера смешения, Д – диффузор,
 И – испаритель, Е – конденсатор, З – капиллярный затвор испарителя,
 Ж – капиллярный насос котла – абсорбера, или насос другой природы,
 Л – механическая работа насоса, Q_k – теплоподвод к кипятильнику, Q_n – теплоподвод к испарителю, Q_c – теплоотвод из конденсатора.

Холодопроизводительность данного устройства определяется прежде всего расходом отсасываемой из испарителя массы хладагента входящего в состав бинарной смеси (например аммиака из водоаммиачного раствора). Для повышения перепада давлений на сопле эжектора [8], парожидкостный тракт профилируется и подбирается оптимальная скорость вращения устройства вокруг оси.

Более эффективное устройство для утилизации тепла выхлопных газов двигателей внутреннего сгорания (ДВС) представлено на рис.5.

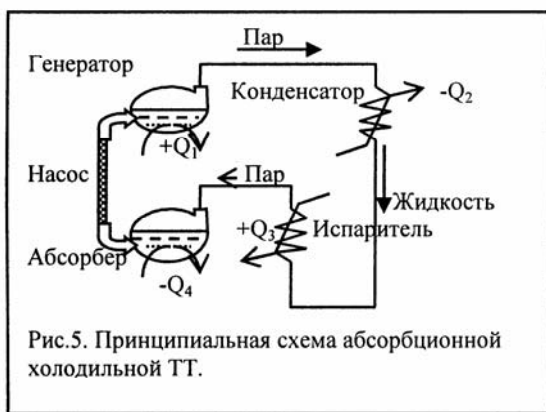


Рис.5. Принципиальная схема абсорбционной холодильной ТТ.

Предлагаемое устройство обладает более совершенным термодинамическим циклом по сравнению с предыдущим и является бескомпрессорной холодильной машиной (БХМ)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Наиболее целесообразным представляется применение ИКТ (рис.3) и ТТХЭ (рис.4) при замораживании грунта за счет естественного охлаждающего импульса атмосферного воздуха. По сравнению с гравитационными термосифонами данные устройства могут обеспечить:

1. более раннее включение в работу и позднее отключение;
2. выработку большого холода за счет холодильного эффекта (для ТТХЭ).

Кроме того, эти устройства можно использовать в качестве теплового насоса для обогрева теплиц или помещений за счет тепла биомассы, из неограниченного грунтового массива или других аккумуляторов тепла.

Применение вращающихся ТТХЭ и БХМ представляется целесообразным для утилизации тепла выхлопных газов автомобильного транспорта. Например, выработки холода для кондиционирования салонов легковых автомобилей, либо для охлаждения продуктов в авторефрижераторе. БХМ можно использовать в качестве теплового насоса для отопления салонов пассажирского транспорта и др.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Быстров П.И., Ивлиутин А.И., Харченко.В.Н., Шульц А.Н. О физических механизмах переноса тепла, массы и импульса. Часть 1. Гидродинамика парового потока // ИФЖ. 1991. Т. 60, № 1. С. 5 -12.
2. Шульц А.Н. Механизмы переноса тепла, массы и импульса в испарительно-конденсационных теплообменниках// Лесной вестник. №2(11). М.: МГУЛ. 2000. С. 32-38.
3. Ивановский М.Н., Сорокин В.П., Ягодкин И.В. Физические основы тепловых труб/ -М: Атомиздат. С. 67-68.
4. Шульц А.Н. Экспериментальное исследование механизмов тепломассопереноса в паровом потоке тепловых труб/Автореферат дисс. канд. техн. наук. -М.: 1990. 22 с.
5. Патент № 2031347 РФ, 6 F 28 D 15/02 «Тепловая труба»/ А.Н. Шульц и др./РФ/ №4949383. Оpubл. 20.03.95. Бюл. №8 -5с.
6. Шульц А.Н. Мониторинг низкопотенциальных тепловых ресурсов и решение проблем их утилизации//ТР 3-ей РНКТ. -М.: Изд-во МЭИ, 2002. С. 131-133.
7. Шульц А.Н. Новые перспективы использования тепловых труб в народном хозяйстве// Лесной вестник №1(21)2002. -М.: МГУЛ. 2002. С. 47-50.
8. Абрамович Г.Н. Прикладная газовая динамика/ Издание 3-е. «Наука». -М.: 1969. С. 31-32.