

ПЛЕНАРНЫЕ ДОКЛАДЫ

УДК 620.22.419.8:539

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ МАШИНОСТРОЕНИЯ

Ю. М. Плескачевский

*Институт механики металлополимерных систем имени В. А. Белого
НАН Беларуси, г. Гомель*

Введение

Специфика производства и эксплуатации продукции машиностроительного комплекса предопределяет и критерии выбора материалов для машиностроения. В общем случае рациональный выбор материалов – это процесс последовательного приближения к оптимальному решению, учитывающему поставленную изначально задачу, особенности конструкции машин, технологию ее изготовления и условия эксплуатации (рис. 1).



Рис. 1. Место и роль материала в процессе создания новой техники (адаптивная схема)

Представляется, что следующий этап в повышении, например, механических характеристик будет связан с материалами, не обязательно демонстрирующими экстремальные показатели прочности и жесткости, но адекватными биотканям по способности адаптироваться к внешнему воздействию, включая способность к самодиагностике, залечиванию повреждений, самоупрочнению и т. д. Это позволит минимизировать вероятность отказов из-за дефектов или экстремальных воздействий, повысить надежность машин и облегчить их утилизацию.

Развитие материаловедения привело к созданию «умных» материалов, сочетающих в себе функции сенсора, процессора и актуатора. Они чрезвычайно перспективны, и во всех промышленно развитых странах им уделяется особое внимание. Так, разрабатываются «умные» обшивки корпусов морских судов, активная поверхность военной техники, самоупрочняющиеся детали машин, искусственная кожа для демпфирования пиковых давлений окружающей среды, широкий спектр компонентов микросистемной техники и т. д.

Можно утверждать, что эти материалы за счет адаптивной реакции обладают качеством системы при взаимодействии с внешней средой. При создании традиционных (однородных) и композитных (неоднородных) материалов стремятся реализо-

вать желаемые свойства на стадии изготовления. С точки зрения структуры и свойств такие системы не эволюционируют. Происходящие в них изменения в связи с неконтролируемыми процессами ползучести, разрушения и т. п., как правило, приводят к ухудшению характеристик и потере работоспособности.

Адаптивные материалы-конструкции демонстрируют иное поведение. Их потребительская ценность обусловлена тем, что разрабатывается не конечная их структура, которая в принципе не может быть оптимальной для всего спектра внешних воздействий при эксплуатации, а лишь базовая, априори нестабильная, способная к рациональной перестройке.

Таким образом, разработка предполагает подвижность базовой структуры термодинамически открытой системы и формулировку критерия качества, регламентирующего выбор уравнения состояния при изменении ситуации. К примеру, с точки зрения недопустимости разрушения, материалы являются «умными», если, приспосабливаясь к внешнему силовому воздействию путем изменения структуры, реализуют запрограммированную разработчиком потребительскую функцию равнопрочности.

Источники новых идей в материаловедении

Если сформулировать обратную материаловедческую задачу и поставить вопрос «Что, в принципе, может явиться источником новых идей в материаловедении?», то следует назвать, по меньшей мере, четыре таких источника.

Первый – это достижения фундаментальных наук. Например, проникновение исследователей на нано- и молекулярный уровень строения веществ открыло целые новые направления управления свойствами материалов и, соответственно, – их новые классы. Перечень таких примеров неисчерпаем.

Второй – это создание и освоение новых высоких технологий. Одним из определяющих критериев новизны технологии является ее способность производить продукт с качественно новыми потребительскими свойствами и/или при недостижимых прежде по эффективности материальных и/или энергетических затратах.

Третий – это некая достаточно универсальная классификация всех (или почти всех) известных материалов, построенная на наиболее общих материаловедческих принципах и обладающая мощной предсказательной силой.

Четвертый источник, из которого материаловеды, хотя и бессистемно, но уже «черпают» идеи – это Природа, живые материальные объекты которой обладают уникальными характеристиками, происхождение, причины проявления и механизмы возможного копирования которых мы только начинаем постигать. В данной работе мы остановимся, в основном, на двух последних.

Систематика как источник новых идей в материаловедении

Анализ «предсказательных возможностей» отраслевых классификаций материалов, а также наши попытки разработать «надотраслевую» классификацию, в основу которой положено широко используемое разделение материалов на конструкционные и функциональные, оказались не плодотворными.

Новый этап в развитии материаловедения и систематики материалов внесло появление композитов – макрогетерогенных, молекулярных, гибридных, объединяющих в одном материале либо изделия различные по природе и характеристике компоненты.

На современном уровне знаний общую эволюцию принципов создания композитов и их целевую функцию можно представить следующим образом:

- получение аддитивных характеристик →
- получение характеристик на основе синергизма →

→ получение эмерджентных (качественно новых) свойств →
 → получение качественно новых предсказуемых свойств →
 → получение комплекса заданных свойств →
 → получение адаптивных единичных свойств →
 → получение адаптивных свойств по всему спектру функциональной программы материала → сочетание в одном материале функций сенсора, процессора и актуатора → достижение возможности самоуничтожения – регенерации (частичной или полной) → достижение возможности взаимодействия с окружающей средой соответственно функциональной программе материала.

Наиболее общая из возможных на сегодняшний день, на наш взгляд [1], [2], классификаций современных и будущих материалов приведена в табл. 1, 2.

Таблица 1

Эволюция структуры и свойств материала

Поколение материалов	Структурно-функциональная характеристика	Способ регулирования свойств	Фактор, определяющий оптимальность
Некомпозиционный (докомпозиционный) материал	Монофункциональный гомогенный материал	Свойства априори определены природой материала компоненты	Исходное качество монокомпоненты
Традиционный композит	Монофункциональный гетерогенный материал с фиксированными межфазными границами	Свойства эффективно регулируются технологическим путем на основе принципов аддитивности и синергизма	Исходное качество компонент и межфазных слоев
Интеллектуальный композит	Полифункциональный гетерогенный материал с подвижными межфазными границами	Саморегуляция структуры на основе сенсорной, процессорной и эффекторной функций, каналов прямой и обратной связи	Способность восприятия пороговых воздействий и эффективность устранения отказов

Таблица 2

Систематика материалов по основным признакам

Функциональное развитие	Степень интеллекта	Качество функционирования	Линия поведения
Монофункциональный	пассивный	материал-заготовка	– предсказуемый материал (пассивное разрушение)
	активный	материал-деталь	– неопределенный материал (непредсказуемое бифуркационное разрушение)
	адаптивный	материал-устройство	– материал-эгоист (заторможенное разрушение при самосохранении функции)

Окончание табл. 2

Функциональное развитие	Степень интеллекта	Качество функционирования	Линия поведения
Полифункциональный	умный мудрый (экофильный)	материал-система материал-среда	– материал-приспособленец (заторможенное разрушение за счет адаптивной реакции) – материал-камикадзе (программируемое саморазрушение) – материал-регенерат (восстановление за счет самоорганизации) – материал-кибер (заторможенное разрушение за счет обратной связи) – материал-инкогнито

Предложенная классификация вводит новые определения и позволяет прогнозировать создание новых, еще практически не исследованных интеллектуальных композитов: «экофильного» материала, являющегося высшей стадией организации материальной системы, поведение которой согласуется с поддержанием идеального «гомеостаза» окружающей среды, «камикадзе» – способного к самоликвидации, «регенерата» – обладающего свойством частичного или полного восстановления, а также материала – «кибера», управляющего окружающей средой в соответствии с его программой функционирования. Под термином материал – «инкогнито» обозначены те материалы системы и среды, которые при сегодняшнем уровне развития техники еще трудно представить.

Существенное усиление предсказательной силы предложенной классификации материалов происходит при использовании основных положений таксономии – теории классификации и систематизации сложноорганизованных материальных или иных объектов, обычно имеющих иерархическое строение [3].

Систематика материалов, при использовании принципов таксонометрии, из двумерной таблицы превращается в многомерную конструкцию со связями, двигаясь по которым, можно не только выбирать требуемый по условиям применения материал, но и обнаруживать узлы конструкции, отвечающие неизвестным прежде по комплексу основных признаков материалам.

Естественно, представленный на рис. 2 трехмерный вариант новой таксономии материалов не является исчерпывающим, но служит фундаментальной основой дальнейшего развития систематики прогностического характера. Прогресс в этом направлении мы связываем с необходимостью нахождения некой определенно существующей матрицы разрешений-запретов и с последующим переходом к n -мерной конструкции. Предстоит каждому таксону (только трехмерный вариант на рис. 2 предполагает существование минимум 312 классов материалов) определить его основные характеристики и, как итог всей комплексной работы, создать компьютерную программу выбора материала с заданными технологическими и эксплуатационными характеристиками.

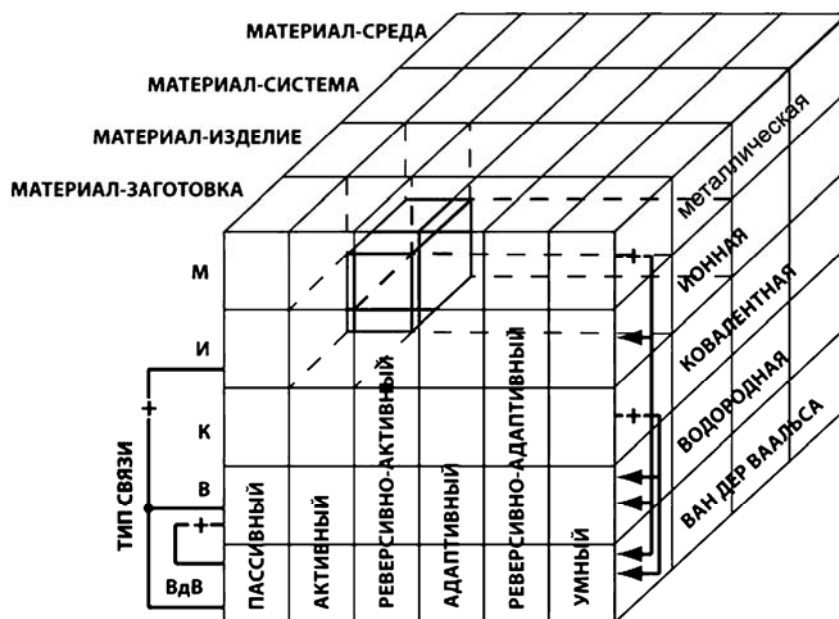


Рис. 2. Новая таксономия материалов

Аналогии в направлениях развития и функционировании природных и технических систем

Практически неисчерпаемые возможности создания новых материалов и систем на их основе вытекают из анализа аналогий в развитии природы и техники.

Учитывая основной контекст настоящей работы, особо отметим общий для природы и техники принцип совершенствования свойств материалов, заключающийся в композитности систем. На нынешнем этапе осмысления технически ценных характеристик объектов живой природы, в развитие и дополнение к вышеназванным, потенциально полезными именно для материаловедения композитов являются [1], [4]:

- мягкие, гибкие компоненты;
- самосборка, самоорганизация, самоумножение (репликация) на основе слабых связей;
- использование шаблона (матрицы) для построения нового объекта;
- деление;
- переменные по объему характеристики;
- самозалечивание;
- реверсивность;
- регенерация;
- самодиагностика.

Пример алгоритма использования специфических характеристик живой природы для получения технически ценных материалов с качественно новыми потребительскими свойствами прост и представлен на рис. 3. Сочетание принципа локального качества, переменных по объему характеристик и подвижных межфазных границ приводит к созданию активных и адаптивных материалов, а также так называемых минкусов, отличающихся квантованным или/и непрерывным распределением по объему значений модулей упругости. Сочетание принципа обратной связи, реверсивности свойств, а также самодиагностики, самоорганизации, самозалечивания и регенерации может привести к получению умных материалов, а также ауксетиков и метаматериалов, обладающих отрицательными значениями коэффициента Пуассона

и коэффициента преломления световых и иных электромагнитных излучений соответственно. В работе будут приведены отдельные конкретные примеры таких материалов.

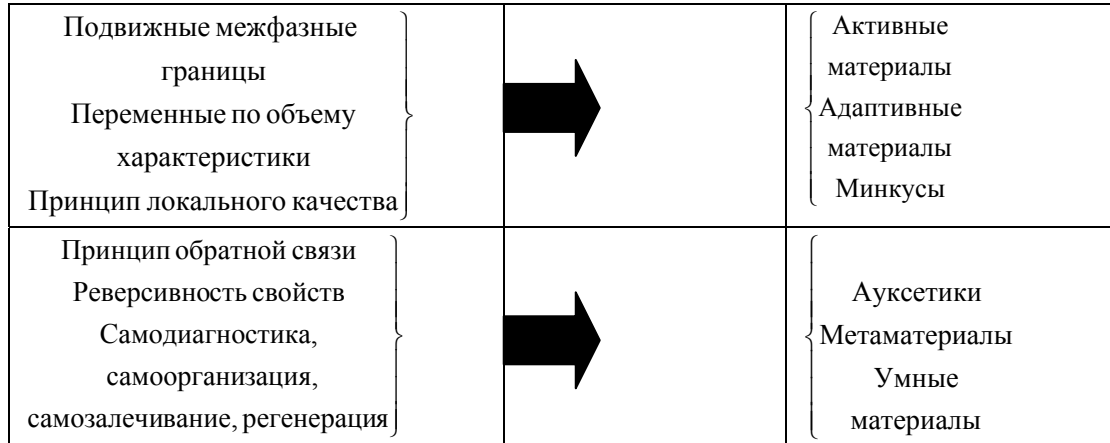


Рис. 3. Использование характеристик объектов живой природы для создания новых технически ценных материалов (пример)

Выводы

С использованием вышеописанных подходов нами разработана концепция и совершенствуется теоретическое описание активных, адаптивных и умных материалов, включающие:

- классификацию материалов на основе многоаспектного структурно-функционального анализа;
- введение понятий инвертированного, активного и реверсивно-активного материалов;
- введение понятий адаптивного и реверсивно-адаптивного материалов, реализующих автоматическую целесообразную перестройку структуры (автолокализацию) при экстремальном внешнем воздействии в соответствии с заданным критерием оптимальности;
- формулировку механизма функционирования активных, адаптивных и умных материалов в виде термодинамически открытой системы с метастабильным фазовым составом и обратными связями;
- разработку теории процесса адаптации конструкционных и функциональных материалов на основе вариационного решения задачи о локализации подвижных границ, контактного взаимодействия и мезомеханического подхода;
- создание новых расчетно-экспериментальных методов механики деформируемого твердого тела для определения напряженно-деформированного состояния неоднородных материалов и конструкций;
- математическое обоснование возможности управления режимами упругого деформирования, контактного трения, пластического и вязкого течения для реализации адаптационных и квазибиологических эффектов в материалах различных классов (пористых и гранулированных средах, композитах, биотканях, смазках, полимерных растворах, строительных конструкциях).

Заключение

На рубеже XX и XXI вв. в материаловедении наметились прорывные направления в создании новых и существенном развитии традиционных принципов форми-

рования активных, адаптивных и умных материалов и систем. Основу подобных принципов составляют систематика материалов, обладающая предсказательной силой, и аналогии в функционировании и развитии природных и технических систем в сочетании с новейшими фундаментальными достижениями смежных наук – физики, химии, биологии, механики, и дополненные возможностями компьютерного моделирования и микросистемной техники эксперимента.

Автор благодарит своего коллегу и ученика канд. техн. наук С. В. Шилько за ценные дискуссии, стимулирующие развитие ряда идей, изложенных в данной работе.

Л и т е р а т у р а

1. Плескачевский, Ю. М. Актуальные проблемы материаловедения XXI века / Ю. М. Плескачевский, С. В. Шилько // Порошковая металлургия. – 2006. – Вып. 29. – С. 28–42.
2. Плескачевский, Ю. М. Этапы развития и уровни организации структуры материалов: адаптивные композиты / Ю. М. Плескачевский, С. В. Шилько, С. В. Стельмах // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 1999. – Т. 43, № 5. – С. 119–123.
3. Таксономия. Большой энциклопедический словарь. — Москва ; Санкт-Петербург : Норинт, 2000. – С. 1176.
4. Madou, M. I. Fundamentals of microfabrication / M. I. Madou // CR. PRESS. – 2002. – 356 p.

УДК 536.24

ТЕПЛООБМЕН ПРИ КИПЕНИИ НА ГЛАДКИХ И РАЗВИТЫХ ТЕПЛОТДАЮЩИХ ПОВЕРХНОСТЯХ

А. В. Овсянник

*Гомельский государственный технический университет
имени П. О. Сухого, Беларусь*

Введение

Теплообменные аппараты испарительного типа широко применяются в энергетике, химической, нефтеперерабатывающей, пищевой промышленности, в холодильной и криогенной технике, в микроэлектронике для охлаждения элементов микросхем, в теплонасосных установках, в жилищно-коммунальном секторе (отопление, горячее водоснабжение, кондиционирование) и т. д.

Существенную экономию топливно-энергетических ресурсов обеспечивает интенсификация теплообмена при кипении жидкостей на развитых поверхностях в мини-котлах барабанного типа с горизонтальным расположением трубного пучка для получения сухого насыщенного пара. Такие котлы могут устанавливаться на передвижных транспортных ядерных установках.

В связи с дефицитом энергоресурсов в Республике Беларусь все большее внимание привлекают теплонасосные установки (ТНУ).

Применение тепловых насосов для целей отопления, горячего водоснабжения и кондиционирования приводит к существенному снижению потребления топливно-энергетических ресурсов и, при этом, значительно сокращается количество вредных выбросов в окружающую среду. Присоединение Республики Беларусь к Киотскому протоколу накладывает на страну определенные ограничения по выбросам и использование тепловых насосов как источника тепловой энергии может частично решить эту проблему. Поэтому снижение температурных напоров в испарителях, их массогабаритных показателей и тепловых потерь является одной из важных задач, ведущих к удешевлению ТНУ и повышению их энергетических показателей. Вклад в решение этих проблем может внести внедрение научно обоснованных и экспериментально проверенных методов интенсификации теплообмена при кипении путем развития теплоотдающей поверхности.

Все эти предпосылки в полной мере относятся к теплоэнергетическим и холодильным установкам.

Несмотря на большое количество работ по теплообмену при кипении, их результаты не полностью отражают процессы теплообмена на развитых поверхностях. При кипении жидкостей на ребрах различного типа еще недостаточно полно исследованы специфические особенности теплообмена, связанные с влиянием геометрических параметров и профиля ребер.

Принятие Монреальской конвенции требует использования в качестве хладагентов экологически безопасных и нетоксичных рабочих тел. Таким требованиям удовлетворяют озонобезопасные хладагенты и, в частности, R134a, обладающий хорошими теплофизическими и термодинамическими свойствами. В связи с этим важным становится исследование процессов теплообмена в теплообменной аппаратуре с установлением зависимостей между количественными характеристиками процесса теплообмена при кипении, режимными параметрами и другими факторами, влияющими на интенсивность теплообмена. Важным методом исследования в этом случае является экспериментальный путь, позволяющий решить эти задачи.

Постановка задачи

Основными задачами исследования явилось теоретическое и экспериментальное исследование процессов теплообмена при развитом пузырьковом кипении легкокипящих жидкостей и озонобезопасных хладагентов на гладких и развитых (оребрённых) неизотермических поверхностях с установлением зависимостей между количественными характеристиками процесса теплообмена при кипении, режимными параметрами и другими факторами, влияющими на интенсивность теплообмена. Полученные универсальные зависимости могут быть использованы при разработке и создании высокоэффективных теплообменных аппаратов испарительного типа.

Результаты работы

Для решения поставленных задач в представленной работе реализовано два направления исследования, дополняющие друг друга: экспериментальное и теоретическое. Экспериментальное исследование теплоотдачи при кипении жидкостей было проведено в области развитого пузырькового кипения, характерного для испарительных систем на стенде, разработанном в ГГТУ им. П. О. Сухого на кафедре ПТЭ и Э. Режимные параметры проведения экспериментов для неизотермических оребрённых поверхностей: жидкости – ацетон, этиловый спирт и фреон 134a; давление насыщения 0,1...0,8 МПа; плотность теплового потока – 8...63 кВт/м². Характеристики исследованных и анализируемых образцов: длина дюралюминиевого образца с прямоугольным, треугольным, трапециевидным и параболическим оребрением составила 280 мм, высота ребра – 12,5 мм, толщина ребра в основании – 2...4 мм, межреберное расстояние – 2...4 мм; диаметр несущей (основной) поверхности – 25 мм.

При кипении на ребрах зарождение паровых пузырей происходило у основания ребер. Вследствие небольшого объема жидкости, заключенной в межреберных каналах, обеспечивался большой перегрев жидкости, что приводило к увеличению толщины перегретого слоя.

В результате анализа полученных зависимостей можно сделать вывод, что средние коэффициенты теплоотдачи по ребру при развитом пузырьковом кипении, практически не зависят от профиля ребра при свободном отводе паровой фазы (рис. 1).

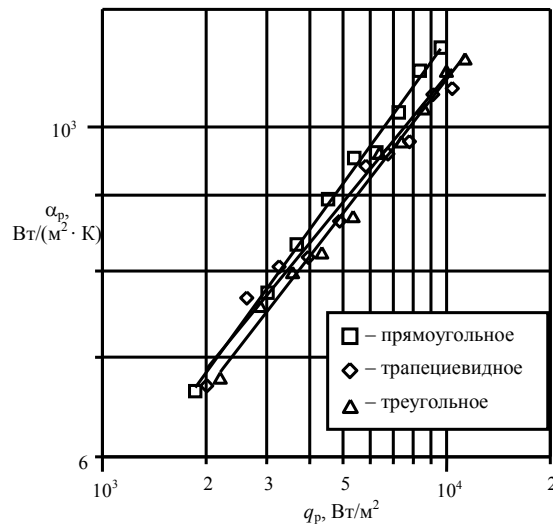


Рис. 1. Зависимости среднего коэффициента теплоотдачи по ребру от плотности теплового потока, отводимого ребром: для продольного оребрения при кипении этилового спирта

На рис. 2 приведены зависимости отношения коэффициентов теплоотдачи (при ΔT основной поверхности) от плотности теплового потока на основной поверхности образца к коэффициентам теплоотдачи на гладкой поверхности — $\alpha_{\text{мп}}/\alpha_{\text{гл}}$, при кипении этилового спирта для всех типов исследованных оребренных поверхностей.

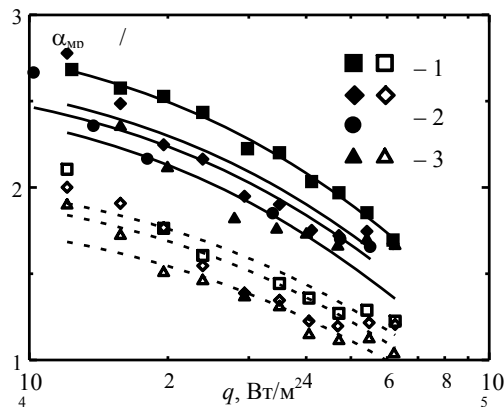


Рис. 2. Зависимость $\alpha_{\text{мп}}/\alpha_{\text{гл}}$ при кипении этилового спирта; сплошные линии — поперечное оребрение; штриховые линии — продольное оребрение

Как видно из рис. 2, при горизонтальном расположении труб, поперечное оребрение в 1,5 раза эффективнее продольного, вследствие большего развития поверхности теплообмена и лучших условий отвода паровой фазы. Наибольшие значения коэффициентов теплоотдачи, в 2,8 раза превышающие аналогичные значения для гладкой поверхности, были получены для образца с поперечным прямоугольным оребрением за счет большей поверхности теплообмена.

При расчете теплоотдачи с оребренной поверхности обычно определяется приведенный коэффициент теплоотдачи $\alpha_{\text{прив}}$.

Следовательно, задача заключается в определении коэффициентов теплоотдачи по элементам оребренной поверхности α_p и α_{mp} .

Процесс теплоотдачи на оребренной поверхности при развитом кипении на ребре можно рассматривать как теплоотдачу при пузырьковом кипении в условиях естественной конвекции на теплоотдающих поверхностях, имеющих различную ориентацию в пространстве.

В результате обобщения экспериментальных данных по теплоотдаче на ребре было получено уравнение

$$Nu_p = 21 \cdot X^{-0,1} K_p^{0,3} Pr^{-0,2}.$$

Результаты опытов описываются полученной зависимостью с погрешностью $\pm 15\%$. Причем данная зависимость справедлива как для продольного, так и для поперечного типов ребер.

При обобщении экспериментальных значений коэффициентов теплоотдачи на межреберной поверхности получены следующие зависимости:

– для поперечного типа оребрения

$$Nu_{mp} = 115 \cdot K_{mp}^{0,4} Pr^{-0,2};$$

– для продольного типа оребрения

$$Nu_{mp} = 85 \cdot K_{mp}^{0,4} Pr^{-0,2}.$$

Отличие в значениях константы C можно объяснить ухудшением условий отвода паровой фазы с нижней поверхности образцов вследствие запаривания поверхности из-за продольного расположения ребер. Погрешность определения α_{mp} также не превышает $\pm 15\%$.

Теплофизические свойства жидкостей существенно влияют на интенсивность теплоотдачи при кипении и, в связи с принятием Монреальской конвенции, запрещающей использование озоноразрушающих хладагентов, необходимо вести поиск экологически безопасных и нетоксичных рабочих тел, способных обеспечить эффективный теплообмен. Это объясняется не только требованиями Монреальского протокола, но и стремлением снизить косвенный и прямой вклад в полный эквивалент глобального потепления холодильного оборудования. Этого можно достичь выбором хладагентов, имеющих высокую энергетическую эффективность и низкий потенциал глобального потепления. Таким требованиям в значительной степени удовлетворяет группа фреонов с нулевым озоноразрушающим потенциалом и низким потенциалом глобального потепления. К таким фреонам относится в частности R134a, являющийся хорошим заменителем запрещенного к применению фреона R12.

В соответствии с этим были проведены экспериментальные исследования по теплоотдаче при кипении фреона-134a в условиях различных давлений насыщения (0,5...0,8 МПа) на гладких технически шероховатых и (0,4...0,7 МПа) на оребренных трубчатых поверхностях нагрева в диапазоне плотности теплового потока 8...63 кВт/м².

На рис. 3 приведены результаты экспериментального исследования зависимости коэффициента теплоотдачи от плотности теплового потока при кипении фреона-134a на гладкой технически шероховатой поверхности при различных давлениях насыщения. Из рисунка видно, что при возрастании плотности теплового потока с увеличением давления насыщения степень увеличения интенсивности теплоотдачи возрастает.

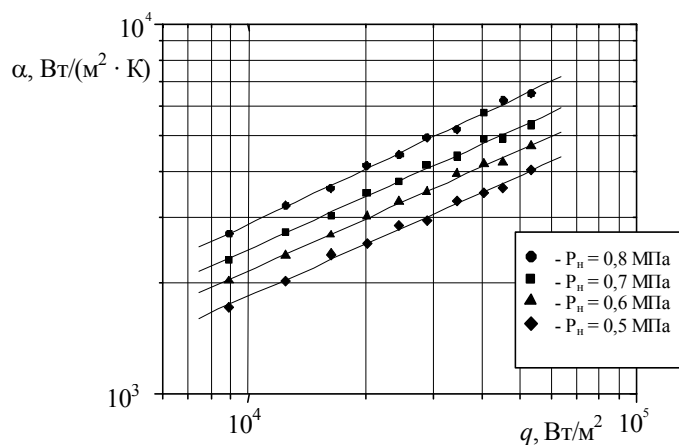


Рис. 3. Экспериментальные зависимости $\alpha = f(q)$ при кипении фреона-134а на гладкой технически шероховатой поверхности

В результате обобщения экспериментальных данных по теплоотдаче при кипении фреона-134а на гладкой технически шероховатой поверхности в условиях большого объема получено критериальное уравнение, позволяющие рассчитать интенсивность теплоотдачи с погрешностью $\pm 20 \%$.

$$\text{Nu} = 15 \cdot K_p^{0,5} \text{Pr}^{-0,2}.$$

На рис. 4 приведены результаты экспериментального исследования зависимости коэффициента теплоотдачи от давления насыщения при кипении фреона-134а на оребренных поверхностях: на межреберной поверхности и на ребре.

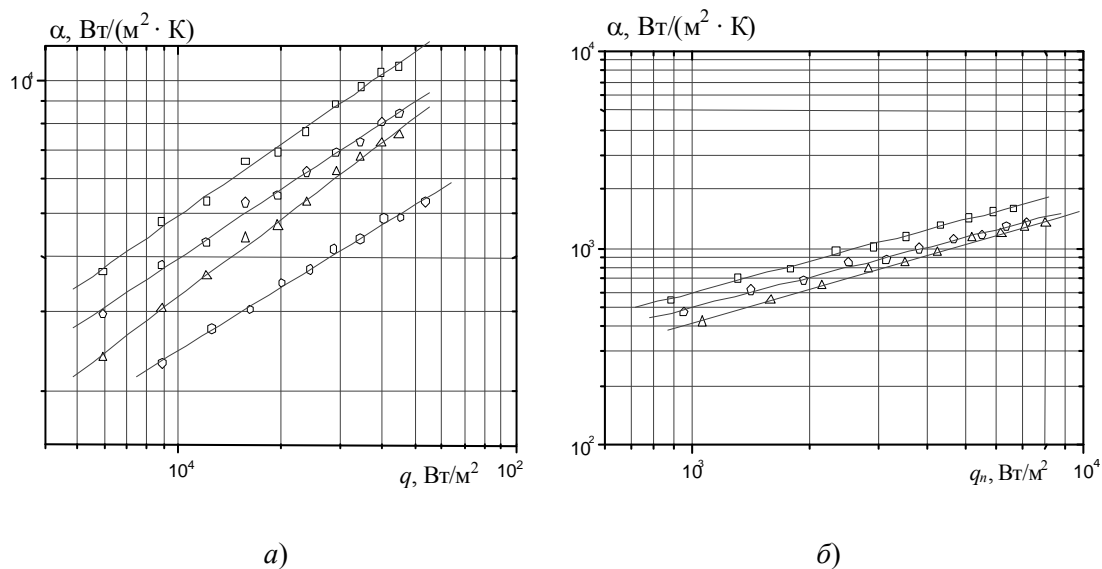


Рис. 4. Сравнение полученных экспериментальных зависимостей при кипении фреона-134а на продольно оребренных поверхностях с различным профилем ребра (круг – технически шероховатая поверхность; треугольник – продольное треугольное оребрение, ромб – продольное трапециевидное оребрение; квадрат – продольное прямоугольное оребрение)

Данные зависимости показывают, что α непрерывно возрастает с увеличением давления, так как увеличивается количество работающих центров парообразования. Однако при достаточно больших плотностях теплового потока преобладающая часть потенциальных центров парообразования уже включена в работу по генерации паровых пузырей и дальнейшее увеличение давления не приводит к интенсификации теплообмена.

В результате обобщения экспериментальных данных по теплоотдаче при кипении фреона-134а на оребренных поверхностях в диапазоне тепловых потоков 8...63 кВт/м² при давлении насыщения $p_n = 0,4 \dots 0,7$ МПа в условиях большого объема получено критериальное уравнение, позволяющие рассчитать интенсивность теплоотдачи с погрешностью ± 25 %:

– для ребра

$$Nu = 1 \cdot X^{-0,15} Re^{0,54} Pr^{-0,37} K_p^{1,22};$$

– для межреберной поверхности

$$Nu = 3,6 \cdot Re^{0,52} Pr^{-0,37} K_p^{0,88}.$$

Анализ существующих моделей теплообмена при кипении на теплоотдающих поверхностях позволяет говорить о том, что в известных моделях процесса кипения на изотермической поверхности постоянные, входящие в расчетные уравнения, определяются эмпирическим путем на основе опытных данных, что не всегда возможно; при постановке задачи авторы моделей используют в качестве одного из определяющих параметров коэффициент теплоотдачи, который должен быть заранее известен или определен опытным путем, что не всегда возможно или крайне затруднительно; физические модели предложены для гладких горизонтальных теплоотдающих поверхностей, не учитывающих ориентацию последних в пространстве. В связи с этим была предложена теплофизическая модель процесса теплообмена при развитом пузырьковом кипении жидкостей на неизотермических оребренных поверхностях для температурного напора «ребро – кипящая жидкость» в пределах $\vartheta_{пк} \leq \vartheta \leq \vartheta_{кр1}$. Здесь $\vartheta_{пк}$ – температурный напор начала кипения; $\vartheta_{кр1}$ – температурный напор, соответствующий первому кризису кипения.

При построении модели рассматривалось уравнение теплового баланса для ребра

$$dQ = dQ_1 + dQ_2.$$

Левая часть уравнения представляет собой количество теплоты, передаваемой теплопроводностью в единицу времени в ребре и определяется по известной зависимости, а правая часть уравнения представляет собой количество теплоты, отводимой боковыми поверхностями ребра в единицу времени и расходуемой на парообразование dQ_1 и количество теплоты, расходуемой на преодоление сил инерции dQ_2 , которые удерживают паровой пузырь на теплоотдающей поверхности.

Таким образом, модель процесса теплообмена при кипении жидкостей на продольных ребрах может быть представлена в виде:

$$f_2(x) \frac{d^2 \vartheta}{dx^2} + \frac{df_2(x)}{dx} \frac{d\vartheta}{dx} = \frac{4\varphi}{\pi d_0^2} \left[\frac{\gamma^2 \rho_n a Ja^2 c_{ж} \vartheta}{\lambda L} + \gamma^2 \left(\frac{3200}{6} \right) \frac{\pi \rho_{ж} a^3 Ja^4}{R_0 \lambda L^2} \right].$$

Дифференциальное уравнение теплопроводности *обобщенного радиального ребра* будет

$$f_2(r) \frac{d^2 \vartheta}{dr^2} + \frac{f_2(r)}{r} \frac{d\vartheta}{dr} + \frac{df_2(r)}{dr} \frac{d\vartheta}{dr} = \frac{4\varphi}{\pi d_0^2} \left[\frac{\gamma^2 \rho_n a J a^2 c_{ж} \vartheta}{2\pi r \lambda} + \gamma^2 \left(\frac{3200}{12} \right) \frac{\rho_{ж} a^3 J a^4}{r \lambda d_0 \pi r_0} \right].$$

Используя дифференциальные уравнения, получим коэффициент теплоотдачи на обобщенном продольном ребре

$$a_* = \frac{4\varphi}{\pi d_0^2} \left[\frac{\gamma^2 \rho_n a J a^2 c_{ж}}{L} + \gamma^2 \left(\frac{3200}{6} \right) \frac{\pi \rho_{ж} a^3 J a^4}{L^2 \vartheta R_0} \right]$$

и на обобщенном радиальном ребре

$$a_* = \frac{4\varphi}{\pi d_0^2} \left[\frac{\gamma^2 \rho_n a J a^2 c_{ж}}{2\pi r} + \gamma^2 \left(\frac{3200}{24} \right) \frac{\rho_{ж} a^3 J a^4}{r \vartheta R_0 \pi r_0} \right].$$

Для различных профилей продольных и радиальных ребер коэффициент теплоотдачи будет определяться по одним и тем же уравнениям, так как в выражениях для различных профилей нет функции профиля ребра.

Коэффициент теплоотдачи продольного

$$Nu = Z J a^2 \gamma^2 \left(\frac{\rho_n}{\rho_{ж}} \right) \left(\frac{l_*}{L} \right) [1 + \Pi_{\text{прод}}]$$

и радиального обобщенного ребра в безразмерном виде:

$$Nu = Z J a^2 \gamma^2 \left(\frac{l_*}{2\pi r} \right) \left(\frac{\rho_n}{\rho_{ж}} \right) [1 + \Pi_{\text{рад}}].$$

Для шипов дифференциальное уравнение теплопроводности будет иметь вид:

$$\left[r(x) \frac{d^2 \vartheta}{dx^2} + 2 \frac{dr(x)}{dx} \frac{d\vartheta}{dx} \right] = \frac{4\varphi}{\pi^2 r(x) \lambda d_0^2} (\gamma^2 \rho_n a J a^2 c_{ж} \vartheta),$$

а коэффициент теплоотдачи будет

$$\alpha_* = \frac{4\varphi}{\pi d_0^2} \left(\frac{\gamma^2 \rho_n a J a^2 c_{ж}}{2\pi r_0^{\text{пр}}} \right).$$

Было проведено сравнение расчетных α с экспериментальными их значениями для продольного и поперечного типов оребрения при различных профилях ребер. Результаты сравнения представлены на рис. 5. Рабочие жидкости – ацетон и этиловый спирт. Давление насыщения – 0,1 МПа. Из рисунка видно, что средние расчетные значения коэффициентов теплоотдачи на ребрах удовлетворительно согласуются с экспериментальными значениями. Погрешность определения коэффициентов теплоотдачи составляет $\pm 20\%$.

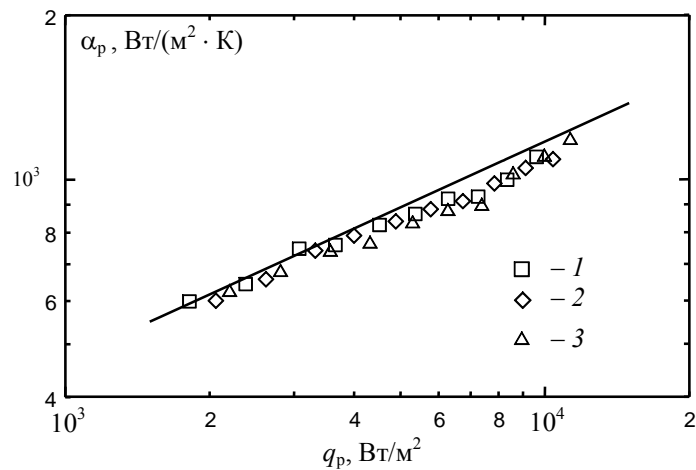


Рис. 5. Зависимость $\alpha_p = f(q_p)$ для продольного оребрения: (ацетон) сплошная линия – расчет по уравнению; символы – экспериментальные значения; 1 – прямоугольный профиль; 2 – трапециевидный; 3 – треугольный

На рис. 6 представлены результаты сравнения расчетных коэффициентов теплоотдачи на ребрах (цилиндрических шипах) постоянного поперечного сечения при кипении на них фреона-113 в диапазоне плотности теплового потока 40...600 кВт/м² при атмосферном давлении. Режим кипения – развитый пузырьковый. Из рисунка видно, что расчетные значения коэффициентов теплоотдачи удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными авторов и погрешность определения α составляет $\pm 30\%$.

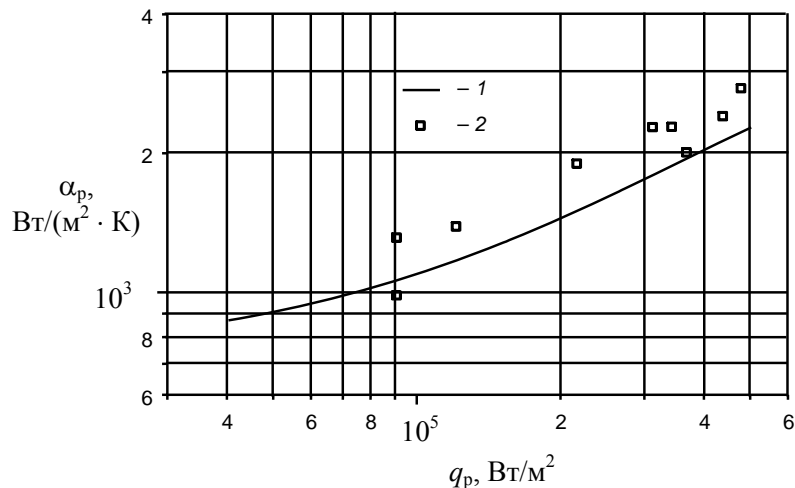


Рис. 6. Зависимости среднеинтегрального коэффициента теплоотдачи цилиндрического шипа от средней плотности теплового потока по шипу: 1 – расчет по уравнению; 2 – экспериментальные данные авторов

Заключение

1. Экспериментально установлено, что при кипении на неизотермической оребренной поверхности в исследованном диапазоне тепловых нагрузок кривая кипения имеет постоянный наклон ($n = \text{const}$ в выражении $\alpha = q^n$), что говорит об от-

сутствии кризисных явлений, приводящих к излому кривой кипения. Интенсивность теплоотдачи зависит от коэффициента оребрения, возрастающая с ростом последнего.

2. Экспериментально установлена степень влияния давления насыщения на интенсивность теплоотдачи оребренной поверхности, показывающая монотонное снижение показателя степени k для ребра в соотношении $\alpha = f(p_n / p_{кр})^k$ при увеличении плотности теплового потока; причем это проявляется в большей степени, чем на несущей поверхности, где начиная с плотности теплового потока $q \approx 40$ кВт/м² влияние давления насыщения на интенсивность теплоотдачи проявляется слабо, что связано с меньшей степенью активации центров парообразования на ребре, обусловленной величиной перегрева теплоотдающей поверхности.

3. Впервые проведены экспериментальные исследования теплоотдачи при кипении озонобезопасного фреона-R134a на гладких технически шероховатых и оребренных поверхностях при давлениях насыщения 0,4...0,8 МПа в диапазоне плотностей тепловых потоков 8...63 кВт/м². Получены обобщенные критериальные зависимости для расчета интенсивности теплоотдачи при кипении R134a в исследованном диапазоне режимных параметров.

4. Впервые разработанная теплофизическая модель теплообмена при развитом пузырьковом кипении жидкостей на неизотермических оребренных поверхностях описывает процессы теплообмена как при продольном, так и при поперечном расположении ребер и решение уравнений теплофизической модели, полученное численным методом, позволяет получить распределение температур и коэффициентов теплоотдачи по высоте ребра. Результаты численного расчета удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными, полученными при кипении ацетона и этилового спирта на продольных и поперечных ребрах различного профиля с погрешностью ± 15 %.

5. Экспериментально и теоретически установлено, что при развитом пузырьковом кипении интенсивность теплоотдачи не зависит от типа и профиля неизотермической оребренной поверхности, а определяется только режимными параметрами, теплофизическими свойствами жидкости, геометрическими размерами оребренной поверхности и внутренними характеристиками процесса кипения.

6. Впервые предложена обобщающая зависимость для расчета коэффициента теплоотдачи ребра как в размерном так и в безразмерном виде, удовлетворительно согласующаяся с экспериментальными данными с погрешностью 15...30 %, что говорит о возможности применения полученных зависимостей для расчета теплообменных аппаратов испарительного типа с оребренными поверхностями без привлечения эмпирических зависимостей и проведения экспериментальных исследований.