

### Программа 3.2.1. Теплофизические основы экологически чистых и ресурсосберегающих систем производства, передачи и трансформации тепловой энергии (координаторы член-корр. РАН С. В. Алексеенко, докт. техн. наук А. П. Бурдуков)

В Институте теплофизики им. С. С. Кута-теладзе исследованы свойства экологически безопасных смесевых фреонов R-404a, R-407c, R-410a, R-507a, C10M1 в жидком и газовом состояниях в широком диапазоне температур и давлений (273—428 К и 0,01—4,2 МПа) (рис. 3). Получены новые прецизионные экспериментальные данные о равновесии жидкость—пар, плотности, скорости звука, теплоемкости и теплопроводности, которые существенно расширяют исследованный интервал параметров состояния, а в ряде случаев являются единственными.

Рассчитаны уравнения состояния перегретого пара и наиболее полные в настоящее время таблицы термодинамических и переносных свойств жидкости и пара, в том числе на кривой сосуществования. Определена температурная зависимость идеально-газовой теплоемкости паров фреонов. Показано, что теория термодинамического подобия (уравнение Ли—Кеслера) позволяет получать достаточно надежные данные по  $P$ ,  $V$ ,  $T$ -свойствам смесевых фреонов.

В том же Институте получено полуэмпирическое уравнение состояния (УС) реальных газов нормальных веществ. Для этого были использованы положения о предпочтительной структуре УС и о поведении изохорной теплоемкости на всей термодинамической поверхности при гипотетическом непрерывном фазовом переходе. УС реального газа записывается в «элементарных функциях» (уравнение Казавчинского), причем температурные функции получены в Институте ранее теоретически при расчете второго вириального коэффициента, а плотностные функции найдены впервые по экспериментальным данным. Полученные уравнения состояния содержат не более восьми эм-

пирических подгоночных коэффициентов и описывают с высокой точностью экспериментальные (табличные) данные о термических и калорических свойствах различных веществ в широком интервале температур и давлений до плотностей, превышающих плотность в критической точке в 1,5 раза. Предложенные уравнения описывают термодинамические данные веществ в 1,5—2 раза лучше, чем все известные в настоящее время малопараметрические уравнения состояния реального газа, в том числе широко известное УС Бенедикта—Вебба—Рубина.

Уравнения позволяют минимизировать объем экспериментальных работ для получения достоверных данных о термодинамических свойствах веществ и материалов, производить

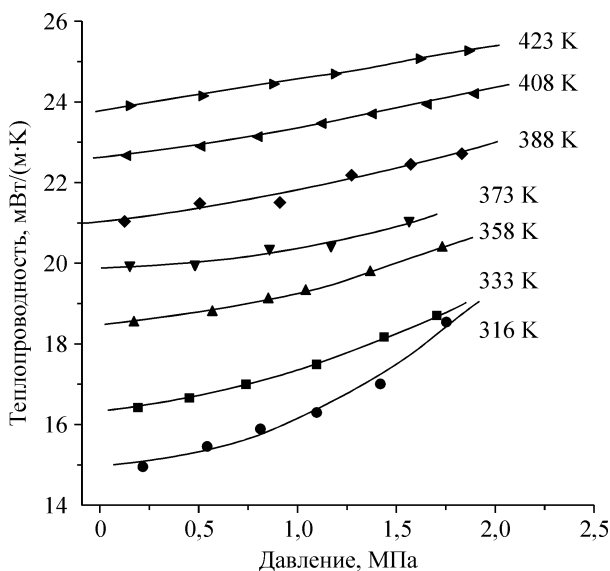
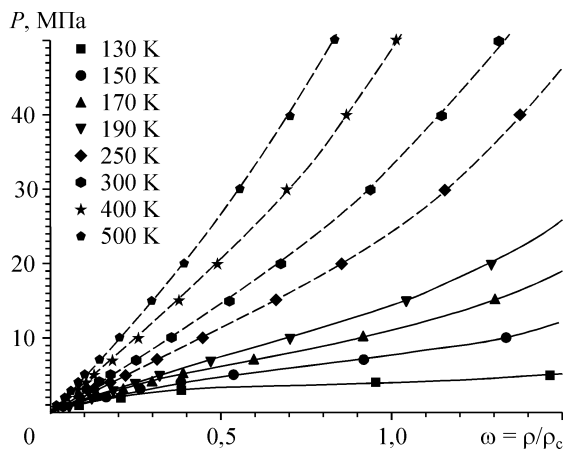


Рис. 3. Результаты измерений теплопроводности R-507a в паровой фазе.



**Рис. 4.** Зависимость давления от приведенной плотности для азота. Сплошные линии — расчетные значения в области 130—190 К, по которым проводился расчет численных значений параметров уравнения состояния. Штриховые линии — экстраполяция в область температур до 500 К. Символы — табличные данные.

надежную экстраполяцию в неизученную область параметров состояния. Пример использования уравнений приведен на рис. 4.

Разработаны абсорбционные бромистолитиевые холодильные машины (АБХМ) и тепловые насосы (АБТН) нового поколения. АБХМ предназначены для получения холодной воды с температурой 5—50 °С, АБТН — для получения горячей воды с температурой 70—900 °С. Данные устройства могут широко использоваться в различных отраслях промышленности, АЭС, коммунальном, сельском хозяйстве и т. д.



**Рис. 5.** Теплонасосная установка мощностью 7000 кВт, состоящая из двух тепловых насосов АБХМ-600Т с газовой топкой. Тепличный комплекс, Краснодарский край.

Разработана конструкторская документация семи базовых моделей холодильных машин и трех моделей тепловых насосов (рис. 5). Созданы промышленные образцы, которые прошли испытания на различных объектах страны.

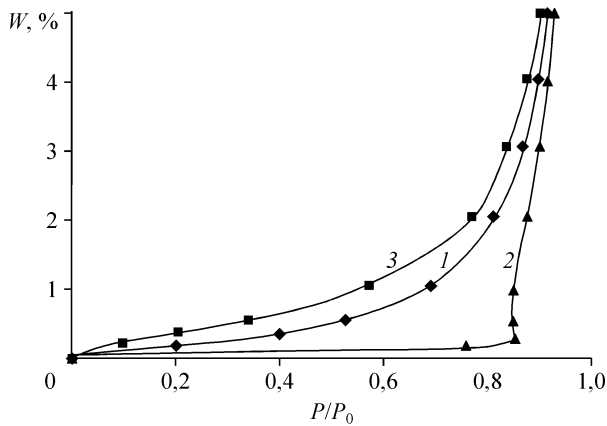
По сравнению с компрессорными электроприводными холодильными машинами АБХМ позволяют экономить 250—300 кВт·ч электроэнергии на каждые 1 000 кВт производимого холода. При производстве теплоты с использованием АБТН удельный расход топлива по сравнению с котлом снижается на 40—55 %. Данные машины являются экологически чистым и экономически эффективным энергосберегающим оборудованием. Созданные машины аналогов в России не имеют и по важнейшим показателям качества соответствуют мировому уровню.

В Улан-Удэнском филиале ИТ СО РАН разработан высокоресурсный электродуговой плазмотрон с самовосстанавливающимися нанокластерными электродами для плазменного воспламенения твердых топлив на пылеугольных тепловых электростанциях (рис. 6).

На основании раман-спектроскопического анализа и электронной микроскопии показано, что электродный депозит, получаемый в плазмотроне окислительным пиролизом пропан-бутановой смеси в условиях высокоточного разряда с магнитной фокусировкой без использования благородных газов (аргон, гелий), представляет собой композитный углеродный материал, построенный из нанокластеров углеро-



**Рис. 6.** Испытания плазмотрона. Нарботанный ресурс катода при мощности плазмотрона 90 кВт составил более 900 ч.



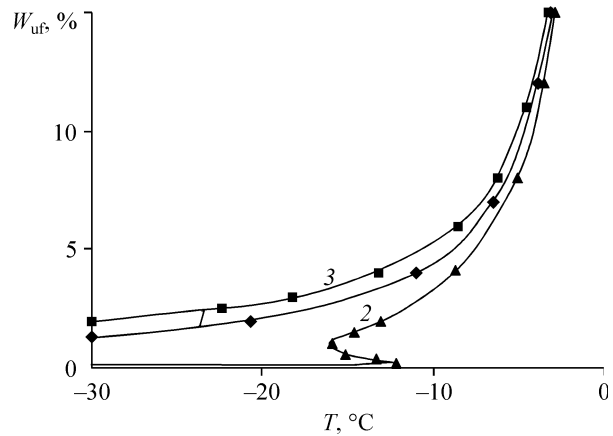
**Рис. 7.** Изотерма адсорбции при  $T = 293$  К и  $M_{sc} = 4000$  г/моль.

1 —  $\bar{H}_{max}^E = 0$  (идеальная система); 2 —  $\bar{H}_{max}^E = 1300$  Дж/моль; 3 —  $\bar{H}_{max}^E = -1200$  Дж/моль.  $P/P_0$  — относительное давление равновесного пара;  $M_{sc}$  — эффективная молярная масса твердого скелета горной породы;  $\bar{H}_{max}^E$  — энергетический параметр взаимодействия твердого скелета и поровой воды.

да, состоящих в основном из многостеночных углеродных нанотрубок, нановолокон и других углеродных форм с некоторым количеством атомов меди, интеркалированных в углеродную матрицу.

Экспериментами подтверждена принципиальная возможность неограниченного увеличения срока службы электродов электродуговых плазмотронов, покрытых пленкой из углеродных наноструктурированных материалов.

В Институте физико-технических проблем Севера разработана новая термодинамическая модель горной породы как единой многокомпонентной многофазной системы, твердый скелет которой моделируется совокупностью частиц с эффективной молярной массой.



**Рис. 8.** Содержание незамерзшей  $W_{uf}$  воды в двухкомпонентной регулярной модели горной породы.

$M_{sc} = 4000$  г/моль.  
1 —  $\bar{H}_{max}^E = 0$  (идеальная система); 2 —  $\bar{H}_{max}^E = 1200$  Дж/моль; 3 —  $\bar{H}_{max}^E = -1200$  Дж/моль.

Модели использованы для изучения закономерностей фазового равновесия воды в мерзлых горных породах. Показаны условия, при которых состояние поровой влаги является неустойчивым.

Адекватность моделей проверена сравнением результатов расчета по ним изотерм адсорбции (рис. 7), содержания незамерзшей воды с экспериментальными данными и эмпирическими формулами. Исследования показали, что в горных породах при высоких значениях энергии взаимодействия компонентов возникают условия, при которых состояние поровой воды является неустойчивым. Это проявляется в виде ступенчатости температурной зависимости незамерзшей воды (рис. 8).