

**ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ БІЛІМ ЖӘНЕ ҒЫЛЫМ МИНИСТРЛІГІ  
МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН  
MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE OF THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN**

**АЛМАТЫ ТЕХНОЛОГИЯЛЫҚ УНИВЕРСИТЕТІ  
АЛМАТИНСКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ALMATY TECHNOLOGICAL UNIVERSITY**

**ХАЛЫҚАРАЛЫҚ ТОҢАЗЫТУ АКАДЕМИЯСЫ  
МЕЖДУНАРОДНАЯ АКАДЕМИЯ ХОЛОДА  
INTERNATIONAL ACADEMY OF REFRIGERATION**



**VII ХАЛЫҚАРАЛЫҚ ҒЫЛЫМИ-ТЕХНИКАЛЫҚ КОНФЕРЕНЦИЯ  
«ҚАЗАҚСТАН-ТОҢАЗЫТУ 2017»**

**VII МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ  
«КАЗАХСТАН-ХОЛОД 2017»**

**VII INTERNATIONAL SCIENTIFIC AND TECHNICAL CONFERENCE  
«KAZAKHSTAN-REFRIGERATION 2017»**

**Конференция баяндамаларының жинағы  
15-16 наурыз, 2017 ж.**

**Сборник докладов конференции  
15-16 марта 2017 г.**

**Proceedings of the Conference  
March 15-16, 2017**

**Алматы, 2017**

УДК 621.56/59(063)  
ББК 31.392  
К14

Сборник докладов подготовлен под редакцией  
доктора технических наук, академика **Кулажанова Т.К.**

**Редакционная коллегия:**

Цой А.П., Бараненко А.В., Кантарбаев Р.А.,  
Шлейкин А.Г., Андреева В.И. (ответ.секретарь)

К14 Казахстан-Холод 2017: Сб. докл. межд.науч.-техн. конф. (15-16 марта  
2017 г.) – Алматы: АТУ, 2017. – 285 с.

ISBN 978-601-263-389-4

В докладах представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований, проведенных в Казахстане, Германии, России, Японии и Украине по следующим направлениям: холодильная техника и компрессоростроение, теплохладоснабжение, системы кондиционирования воздуха и жизнеобеспечения, экология в холодильной промышленности, холодильная и пищевая технология. Сборник рассчитан на специалистов и ученых, работающих в областях холодильной, пищевой, химической, нефтеперерабатывающей промышленности, а также на специалистов по системам кондиционирования воздуха и жизнеобеспечения жилых, коммерческих зданий и спортивных комплексов.

УДК 621.56/59(063)  
ББК 31.392

ISBN 978-601-263-389-4

© АТУ, 2017

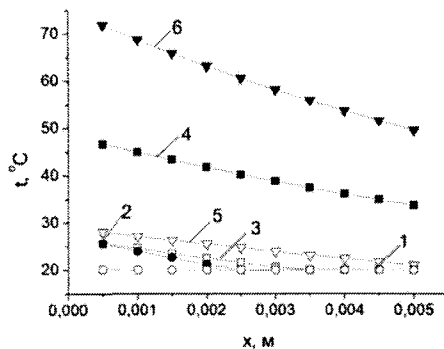


Рисунок 3 – Температура массива в зависимости от координаты при различной экспозиции в СВ поле. Линии 1,3,5 – зерно; 2,4,6 – вода.

Для граничных условий III рода в настоящее время существуют аналитические решения, позволяющие рассчитать локальные температуры при наличии одного положительного источника теплоты [7] и при наличии двух источников теплоты [8], положительного и отрицательного.

1. Для получения достоверных данных по температурам материала по аналитическим зависимостям, полученным для безразмерной избыточной температуры, требуется выполнение условия  $t_c > t_0$  (температура среды выше температуры материала).

2. Расчет локальных и средних температур по разработанным математическим моделям с учетом двух внутренних источников теплоты, положительном и отрицательном, позволяет получать удовлетворительные данные также при условии  $t_c = t_0$ .

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Демьянчук, Б. А. Принципы и применения микроволнового нагрева [Текст] / Б.А. Демьянчук. – О.: Черноморье, 2004. – 520 с.
2. Campanone, L.A. Mathematical analysis of microwave heating process [Text] / L.A. Campanone, N.E. Zaritzky // Journal of Food Engineering, 2005. – No. 69. – P. 359- 368.
3. Thostenson, E.T. Microwave processing: fundamentals and applications [Text] / E.T. Thostenson, T.W. Chou // Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 1999. – Vol. 30, № 9. – P. 1055-1071.
4. Nelson, S. O. Dielectric Properties of Agricultural Products and Some Applications [Text] / S.O. Nelson // J. of Res. Agr. ENG, 2008. – Vol. 54, №2. – P. 102-112.
5. Лыков, А. В. Теория теплопроводности / А. В. Лыков. – М.: 1967. – 559 с.
6. Волгушева, Н. В. Кинетика сушки плотного слоя дисперсного материала (на примере гречихи) при различных способах подвода теплоты : дисс... канд. техн. наук : 05.14.05 / Н.В. Волгушева. – О.: 2005. – 225 с.
7. N. Kolesnychenko, N. Volgusheva, I. Boshkova. Analytical study of the processes of thermal conductivity at high intensity heating [Text] // EAST-EUROPEAN JOURNAL OF ENTERPRISE TECHNOLOGY: Energy-saving technologies and equipment. VOL 5, NO. 8 (83) (2016). – P. 26-31.
8. Дементьева, Т.Ю. Интенсификация процессов теплового переноса при сушке зернового материала с применением микроволнового электромагнитного поля.: дис. канд. техн. наук : 05.14.05 / Т.Ю. Дементьева. – 2013. – 137 с.

УДК 536.423:536.71

#### МЕТОДЫ РАСЧЕТА ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СМЕСЕЙ ХЛАДАГЕНТОВ

Волчок В.А., к.т.н.

Одесская национальная Академия пищевых технологий Украина  
E-mail: recvic@fe.net.ua

По теплофизическим свойствам чистых хладагентов накоплен достаточно большой материал. Существуют банки данных о свойствах веществ, на основе которых можно рассчитать равновесные и

переносные свойства хладагентов, построить диаграммы и рассчитать параметры цикла холодильной машины.

#### I. Анализ возможностей методов расчета термодинамических свойств хладагентов.

Анализ существующих методов определения термодинамических свойств (ТДС) веществ смесей показывает, что ни один из них не обладает прогнозирующими возможностями, достаточными для получения надежных результатов в широком диапазоне параметров состояния. Поэтому на практике используют те или иные модельные подходы к описанию термодинамического поведения смесей, уточняемые на основе опытных данных [1].

К их числу относятся единые уравнения состояния (ЕУС), представляющие собой одноструктурные формы, позволяющие воспроизводить ТДС с заданной малой погрешностью, как жидких, так и газообразных смесей, которые связывают давление  $P$  с объемом  $v$  и температурой  $T$ , согласовывать экспериментальные данные на границах двухфазной области жидкость-пар в интервале от  $T_{тр}$  до  $T_{кр}$ , а для многокомпонентных систем - также с составом (молярными долями компонентов). Составление ЕУС, охватывающих широкий интервал изменения  $p$ ,  $T$  или  $P$ ,  $T$  независимых переменных и в настоящее время является актуальной задачей [2].

Известно, что пользуясь уравнениями состояния (УС), можно раскрыть зависимость термодинамических функций от  $v$  и  $P$ , проинтегрировать дифференциальные термодинамические соотношения, рассчитать летучести (фугитивности) компонентов системы, через которые обычно записывают условия фазового равновесия. Кроме того, можно установить связь между уравнениями состояния и любым из термодинамических потенциалов системы, выраженным в виде функции своих естественных переменных. Например, если известна энергия Гельмгольца  $p = -(\partial F/\partial V)_T$  (свободная энергия  $F$  как функция от  $T$  и  $V$ ), то УС не может быть получено с помощью одних только законов термодинамики, оно определяется из опыта или выводится методами статистической физики.

Для чистого вещества УС одновременно описывает свойства паровой и жидкой фаз на линии насыщения. Для многокомпонентной системы УС представляет собой термодинамическую модель равновесных паровой и жидкой фаз в отдельности.

#### II. Поиск оптимальной формы уравнения состояния.

Одной из важных задач является поиск оптимальной формы УС, способной с точностью эксперимента описывать термические, калорические и акустические опытные данные как в газовой, так и в жидкой фазах. За подобным макроскопическим описанием скрывается сложный механизм межчастичного взаимодействия, характер которого в жидкости и газе имеет существенные отличия. При высоких температурах и умеренных давлениях преобладают парные и тройные взаимодействия и поведение такой системы может быть описано УС, содержащим два-три вириальных коэффициента.

Многокоэффициентные УС представляют собой записанные в вириальной форме УС. Входящие в уравнение вириальные коэффициенты учитывают различные взаимодействия частиц вещества (парные, тройные, четвертные и т.д.). УС в вириальной форме теоретически достаточно обоснованы для газов малой плотности. Использование же этих уравнений для описания состояния вещества при больших плотностях связано со сложностью определения вириальных коэффициентов более высокого порядка. В связи с этим в последнее время создаются эмпирические уравнения состояния, в которых давление представлено в виде полинома от плотности с коэффициентами, зависящими от температуры. Эти уравнения содержат также экспоненциальный член, введенный для компенсации членов более высокого порядка вириального уравнения.

#### III. Возможности различных форм УС.

Для проведения сравнительного анализа различных форм УС, с целью выявления их возможностей при описании термодинамической поверхности бинарных зеотропных смесей хладагентов, были выбраны три широко применяемые УС и сопоставлены результаты расчета ТДС по оригинальной версии УС Пенга-Робинсона (ПР), модифицированному УС Ли-Кеслера (ЛК) и УС свободной энергии Гельмгольца (СЭГ) с оптимальными перекрестными параметрами.

Принципиальная невозможность одновременного точного описания параметров критической точки индивидуальных веществ и смесей на их основе не позволила точно воспроизвести экспериментальные данные кубическим УС ПР. В целом УС ПР по сравнению с многоконстантными УС показало достаточно приемлемую точность для инженерных расчетов.

Сравнительный анализ различных форм УС был проведен на основе использования экспериментальных данных о давлении кипения бинарных зеотропных смесей хладагентов полученные в рамках настоящей работы. В то же время, для нахождения перекрестных

коэффициентов УС ЛК и СЭГ учитывался весь массив экспериментальных данных полученных как в настоящей работе, так и данные других авторов с учетом погрешностей измеряемых величин.

В таблице 1 показан сравнительный анализ среднеквадратичных отклонений рассмотренных УС от экспериментальных данных по давлению кипения хладагента R401A.

Таблица 1 – Сравнение экспериментальных значений давления кипения хладагента R401A с расчетами по различным уравнениям состояния

Эксперимент		Расчет					
		уравнение ПР		уравнение ЛК		уравнение СЭГ	
Т, К	Р, МПа	Р, МПа	δР, %	Р, МПа	δР, %	Р, МПа	δР, %
289.17	0.5881	0.6113	3.95	0.5942	1.04	0.5952	1.20
298.90	0.7860	0.8054	2.47	0.7831	-0.37	0.7851	-0.11
302.03	0.8494	0.8766	3.21	0.8524	0.36	0.8548	0.64
312.47	1.1229	1.1483	2.27	1.1169	-0.54	1.1207	-0.20
322.78	1.4461	1.4733	1.88	1.4332	-0.89	1.4385	-0.53
330.53	1.7306	1.7587	1.63	1.7114	-1.11	1.7175	-0.76

Проведенное сравнение показало, что опытные значения давления кипения бинарных зеотропных смесей хладагентов, полученные в настоящей работе, вполне адекватно согласуются с данными, опубликованными рядом авторов [3]. Это позволило в дальнейшем с уверенностью опираться на эти результаты.

Детальное сравнение трех форм УС при описании давления кипения тройной смеси – хладагента R401A показало, что кубическое УС ПР при использовании ограниченной информации и без учета взаимодействия компонентов смеси ( $\theta_{ij} = 1$ ) достаточно удовлетворительно согласуется с экспериментальными данными, полученными в рамках настоящей работы.

Многоконстантное УС ЛК в отдельных случаях превосходит по точности УС СЭГ для бинарных смесей хладагентов, но в целом уступает ему при описании термодинамической поверхности многокомпонентной смеси - хладагента R401A. Отклонения экспериментальных данных по давлению кипения хладагента R401A соизмеримы с погрешностью измеренных данных.

1. Модель описания ТДС веществ многокомпонентных смесей хладагентов, основанная на УС СЭГ, даёт возможность расчета ТДС смесей хладагентов на основе правил комбинирования констант УС.

2. Использование скорректированных параметров УС СЭГ позволяет более реалистично описывать имеющиеся экспериментальные данные, по сравнению с другими методиками.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Митропов, В.В. Способы включения опытных данных в программу построения взаимосогласованных уравнений состояния [Текст] / В.В. Митропов, А.В. Клецкий // Известия СПбГУНиПТ. – 2006. - № 2. – С. 13-15.
2. Захаров, Н.Д. Многокомпонентные рабочие тела дроссельных микрокриогенных систем [Текст] / Н.Д. Захаров. – Одесса: Полиграф, 2008. – 81 с.: ил.
3. Lemmon, E. W. NIST Standard Reference Database 23, NIST Reference Fluid Thermodynamic and Transport Properties–REFPROP, version 8.0. [Text] / E. W. Lemmon, M. L. Huber, M. O. McLinden // Standard Reference Data Program, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD. – 2007.