

УДК 536.423.1

ИНТЕНСИВНОСТЬ ТЕПЛООТДАЧИ ПРИ КИПЕНИИ БИНАРНЫХ СМЕСЕЙ ХЛАДАГЕНТОВ В УСЛОВИЯХ СВОБОДНОЙ КОНВЕКЦИИ

А.А. ВОЛОШКО

Научно-исследовательский и проектный институт газовой промышленности, Астрахань

Выполнен краткий обзор и приведены основные результаты экспериментальных исследований интенсивности теплоотдачи при кипении бинарных смесей хладагентов в условиях свободной конвекции. Рассмотрены основные особенности механизма кипения бинарных неазеотропных смесей с использованием диаграммы фазового равновесия. Показано, что характерное изменение коэффициентов теплоотдачи при кипении смеси хладагентов определяется особыми условиями переноса теплоты от поверхности нагрева.

Проблема применения традиционных фреонов в хладотехнике и поиск альтернативных им рабочих веществ в последние годы приобретает особое значение [1, 2]. К настоящему времени накоплен определенный экспериментальный материал по изучению особенностей работы холодильных машин, где в качестве рабочего тела использованы различные бинарные смеси известных хладагентов. Анализ полученных в этих исследованиях результатов показал, что применение смеси хладагентов по сравнению с использованием однокомпонентного рабочего тела дает следующие основные преимущества [3]: повышение энергетической эффективности термодинамических циклов при равных температурных уровнях; реализация низкотемпературного цикла при одноступенчатой схеме (расширение температурных границ использования холодильной машины); осуществление эффективного производства холода на различных температурных уровнях при работе холодильной машины с одним компрессором; существенное снижение отрицательного влияния используемых хладагентов на экологическую обстановку.

Рабочая смесь хладагентов, один из компонентов которой хорошо растворяет масло, позволяет понизить температуру расслоения смеси с маслом и улучшить возврат масла в компрессор.

Известно, что основными теплообменными аппаратами холодильной машины являются испаритель и конденсатор, от интенсивности протекающих процессов в которых в значительной степени зависит эффективность работы холодильной машины в целом. Использование различных бинарных смесей хладагентов в качестве рабочего тела холодильных машин требует детального исследования процессов кипения и конденсации этих смесей в необходимом диапазоне изменения основных режимных параметров.

Экспериментальное исследование теплообмена при кипении водоаммиачного раствора впервые проведено В.Н. Филаткиным [4, 5]. Кипение происходило на наружной поверхности горизонтальной стальной трубки диаметром $d = 28$ мм и длиной $L = 450$ мм. Электрический нагреватель размещался

внутри экспериментальной трубки. Концентрация раствора по низкокипящему компоненту смеси (НКС) изменялась в диапазоне $\xi'_0 = 0 - 1,0$ и определялась методом фильтрования. Изменение основных режимных параметров в опытах составляло: давление насыщения $P_s = (0,5 - 1,4)$ МПа, плотность теплового потока $q = (1 - 29) \cdot 10^3$ Вт/м².

Результаты измерений показали, что наибольшими значениями коэффициента теплоотдачи характеризуется кипение чистых компонентов смеси воды и аммиака. Минимальные значения коэффициента теплоотдачи получены для смеси с концентрацией НКС $\xi'_0 \cong 0,3$, при которой разность концентраций аммиака в паровой и жидкой фазах имеет наибольшее значение $\Delta\xi_{\max} = \xi''_0 - \xi'_0$. Показано, что при кипении водоаммиачного раствора коэффициент теплоотдачи определяется давлением насыщения, плотностью теплового потока и концентрацией НКС. Построена номограмма для определения коэффициента теплоотдачи по указанным параметрам.

Экспериментальное исследование интенсивности теплоотдачи при кипении бинарной смеси R22/R12 в большом объеме впервые выполнено в работе [6]. Поверхностью нагрева здесь служила горизонтально расположенная стальная (1X18H9T) трубка диаметром $d = 9$ мм и длиной $L = 160$ мм, нагрев которой обеспечивался непосредственно переменным током низкого напряжения. Основные режимные параметры в опытах изменялись в диапазонах: температура насыщения $T_s = (243 - 293)$ К, $q = (2 - 25) \cdot 10^3$ Вт/м², $0 \leq \xi'_0 \leq 1,0$. Было установлено, что зависимости коэффициентов теплоотдачи от концентрации НКС имеют отчетливо выраженный минимум, соответствующий максимальной разности концентраций НКС в паровой и жидкой фазах. Максимальная разность НКС в исследуемых фазах составляла $\Delta\xi'_{\max} \cong 0,1$, не зависела от изменения температуры насыщения и соответствовала $\xi'_0 \approx 0,25$. При снижении температуры насыщения минимум теплоотдачи проявлялся менее отчетливо. Для обобщения опытных данных по теплоотдаче при кипении смеси хладагентов была предпринята попытка использовать метод термодинамического подобия.

В работе [7] представлены результаты измерения теплоотдачи при кипении бинарных смесей R142/R11 в большом объеме на одиночной горизонтальной медной трубке диаметром $d = 14,6$ мм и длиной $L = 100$ мм. Условия проведения опытов: $P_s = (0,13 - 0,33)$ МПа, $q = (6,5 - 26,2) \cdot 10^3$ Вт/м², $\xi'_0 = 0 - 1,0$. Измерения концентрации R142 в паровой и жидкой фазах смеси проведены с помощью хроматографа. Установлено, что минимум теплоотдачи, как правило, соответствовал максимальной разности концентраций R142 в паровой и жидкой фазах. С ростом плотности теплового потока минимум теплоотдачи проявляет себя наиболее характерно, а влияние давления в указанном диапазоне его изменения находилось в пределах погрешности измерений. Обнаружено, что с ростом концентрации R142 в смеси показатель степени в зависимости вида $\alpha \sim q^n$ несколько снижается.

В работе [8] приведены результаты экспериментального исследования теплоотдачи при пузырьковом кипении бинарных смесей фреонов R12/R113, R22/R12, R13/R22 и R13/R23. Основные режимные параметры изменялись в диапазоне: $P_s = (0,1 - 2,0)$ МПа, $T_s = (198 - 333)$ К, $q = (4,0 - 10^2) \cdot 10^3$ Вт/м². Кипение указанных смесей происходило на горизонтальной электрически нагреваемой медной пластине площадью 300 мм². Показано, что коэффициент теплоотдачи при кипении бинарных смесей ниже, чем при кипении чистых компонентов. При этом для определенных режимных параметров на кривой $\alpha = \varphi(\xi'_0)$ наблюдается минимум, который, как правило, соответствует макси-

мальной разности концентраций НКС в паровой и жидкой фазах. С ростом давления насыщения эффект снижения коэффициента теплоотдачи возрастает. Указанный эффект определяется также составом бинарной смеси. Для смеси R22/R12 при $q = 40 \cdot 10^3$ Вт/м² снижение коэффициента теплоотдачи наблюдалось при $P_s > 0,2$ МПа, для смеси R13/R12 ($q = 40 \cdot 10^3$ Вт/м²) минимум теплоотдачи обнаружен при $P_s \leq 0,2$ МПа.

Особого внимания заслуживает влияние давления насыщения на интенсивность теплоотдачи при кипении бинарных смесей. В области относительно малых значений плотности теплового потока с ростом давления насыщения коэффициент теплоотдачи возрастает. При увеличении q влияние P_s на коэффициент теплоотдачи постепенно нивелируется, а при дальнейшем росте плотности теплового потока большему давлению насыщения отвечает меньшее значение коэффициента теплоотдачи. Для смеси R13/R12 с концентрацией R13 $\xi'_0 = 0,75$ при $q \leq 10^4$ Вт/м² с ростом P_s коэффициент теплоотдачи возрастает; при $q > 10^4$ Вт/м² увеличение давления насыщения приводит к снижению интенсивности теплоотдачи. На основе анализа и обработки полученных экспериментальных данных для исследованной системы бинарных смесей и указанного диапазона изменения основных режимных параметров получено эмпирическое уравнение для расчета коэффициента теплоотдачи:

$$\alpha / \alpha_{\text{ад}} = \left[1 + k \Delta \xi (\rho'' / \rho') q^{0,48+0,1\xi'} \right]^{-1}, \quad (1)$$

где $\Delta \xi$ — разность мольных концентраций НКС в паровой и жидкой фазах, ρ' , ρ'' — плотность жидкости и пара, $\alpha_{\text{ад}}$ — аддитивное значение коэффициента теплоотдачи для бинарной смеси. Коэффициент k определяется составом компонентов бинарной смеси и разностью их температур кипения при нормальных физических условиях: для $0 \leq \Delta T_s \leq 80$ К $0,5 \leq k \leq 2,0$. Анализ уравнения (1) показал, что оно не отражает особенностей влияния давления насыщения на интенсивность теплоотдачи, которые были экспериментально установлены, а поэтому не соответствует всему объему полученных опытных данных.

В работе [9] экспериментально получены константы фазового равновесия и коэффициенты теплоотдачи при кипении в большом объеме на наружной поверхности медной горизонтальной трубки бинарной смеси R22/R114. Условия экспериментов: $d = 8$ мм, $L = 200$ мм, микронеровность поверхности нагрева $\delta = 1$ мкм, $P_s = (0,6 - 5,0)$ МПа, $q = (10^2 - 10^5)$ Вт/м². Составы паровой и жидкой фаз определяли хроматографическим методом с погрешностью в пределах 0,7 %. Результаты измерений коэффициентов теплоотдачи показали, что их значения для смеси значительно ниже, чем для чистых компонентов. С увеличением P_s и q значение α для смеси возрастает в меньшей степени, чем у чистых компонентов.

Исследования в качестве хладагента бинарной смеси R22/R142 показали [10], что указанная смесь представляет значительный интерес при разработке кондиционеров и охладительно-фильтрующих агрегатов для различных машин. Для проектирования испарителей проведено изучение теплоотдачи при кипении этой смеси в большом объеме. Диапазон изменения основных режимных параметров составлял: $P_s = (0,278 - 0,562)$ МПа, $T_s = (261 - 304)$ К, $q = (2,45 - 19,6) \cdot 10^3$ Вт/м², $\xi'_0 = 0,1 - 0,75$. Минимум коэффициента теплоотдачи обнаружен при $\xi'_0 = 0,37 - 0,42$.

Результаты исследования теплоотдачи при кипении смеси R22/R142B на наружной поверхности одиночной гладкой медной трубки диаметром $d = 17,3$ мм и длиной $L = 300$ мм приведены в [11]. Основные режимные параметры изменяли в диапазонах: $T_s = (253 - 283)$ К, $q = (1,0 - 15,0) \cdot 10^3$ Вт/м²,

$\xi'_0 = 0 - 1,0$. Полученные экспериментальные данные по влиянию концентрации НКС, плотности теплового потока и давления насыщения на коэффициенты теплоотдачи в основном согласуются с результатами исследований, изложенными выше. Для расчета коэффициента теплоотдачи при кипении смеси R22/R142B в указанном диапазоне режимных параметров предложено эмпирическое уравнение

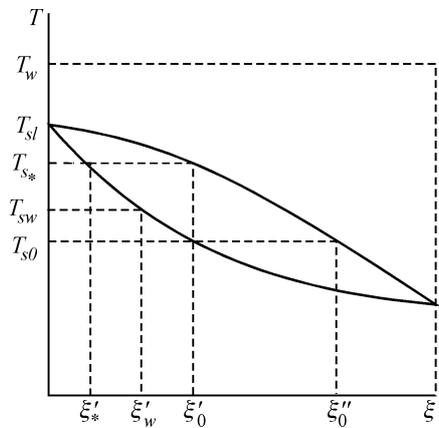
$$\alpha / \alpha_{\text{ad}} = \left[1 + \frac{8,075 \xi^{1,05}}{T_s^{0,27}} \left(1 - \xi^{0,85} \right)^{0,87} \right]^{-1}. \quad (2)$$

Из уравнения (2) видно, что оно не соответствует предельным случаям: $\alpha = \alpha_{22}$ при $\xi = 1,0$ и $\alpha = \alpha_{142}$ при $\xi = 0$. В указанных случаях из (2) следует $\alpha = \alpha_{\text{ad}}$, что указывает на ограниченность эмпирического уравнения (2).

В работе [12] приведены основные особенности механизма кипения бинарных неазеотропных смесей взаимно растворимых жидкостей. Эти особенности прежде всего отражаются на физических характеристиках процесса, к которым относятся скорость роста паровых пузырей и плотность центров парообразования на поверхности нагрева, отрывной размер и частота отрыва пузырька. Совокупность указанных характеристик в конечном счете определяет интегральный эффект процесса — величину коэффициента теплоотдачи. Поэтому для разработки теории переноса теплоты при кипении особое значение имеют теоретические и экспериментальные исследования физических характеристик механизма процесса. На рисунке показана характерная диаграмма фазового равновесия для бинарной неазеотропной смеси при $P_s = \text{const}$. Концентрация НКС вблизи поверхности нагрева ξ'_w ниже равновесного значения в основном объеме жидкости ξ'_0 . Температура насыщения у поверхности нагрева T_{sw} определяется концентрацией ξ'_w . Это повышение температуры насыщения в пристенной области при граничных условиях первого рода ($T_w = \text{const}$) приводит к уменьшению действительного перегрева жидкости у поверхности нагрева, что отражается на условиях зарождения паровых пузырей, скорости их роста, отрывном размере, частоте отрыва, плотности центров парообразования.

Для оценки значений ξ'_w введем функцию концентраций в виде

$$F(\xi) = \frac{\xi'_0 - \xi'_w}{\xi'_0 - \xi'_*}, \quad (3)$$



где ξ'_* — концентрация НКС в жидкой фазе при $\xi'_0 = \xi''_0$. Из выражения (3) видно, что функция концентраций изменяется в диапазоне 0 — 1,0. Значение ξ'_w в первом приближении можно оценить, принимая $F(\xi'_*) = 0,5$. Тогда

$$\xi'_w = 1/2 (\xi'_0 + \xi'_*). \quad (4)$$

Характерная диаграмма фазового равновесия для бинарной неазеотропной смеси.

Температура насыщения вблизи поверхности нагрева определяется соотношением

$$T_w = T_{s0} + (\xi'_0 - \xi'_w) \left(dT_s / d\xi' \right)_{\xi' = \xi'_0}. \quad (5)$$

Зарождение паровой фазы на поверхности нагрева и плотность центров парообразования определяются значением действительного, или эффективного, перегрева

$$\Delta T_{\text{эф}} = T_w - T_{sw} = \frac{4\sigma T_{sw}}{r\rho'' d_{\text{кр}}}, \quad (6)$$

где $d_{\text{кр}}$ — размер активной микровпадины поверхности нагрева, σ — коэффициент поверхностного натяжения. Из уравнения (6) следует

$$T_{sw} = T_w \frac{r\rho'' d_{\text{кр}}}{r\rho'' d_{\text{кр}} + 4\sigma}. \quad (7)$$

Совместное рассмотрение уравнений (5) и (7) позволяет уточнить значение концентрации НКС вблизи поверхности нагрева:

$$\xi'_w = \xi'_0 - \left[\frac{T_w}{(1 + 4K\sigma)} - T_{s0} \right] \left(\frac{dT_s}{d\xi'} \right)_{\xi' = \xi'_0}^{-1}. \quad (8)$$

По значению ξ'_w определяются T_{sw} и эффективный перегрев поверхности нагрева $\Delta T_{\text{эф}} = T_w - T_{sw}$, который следует использовать при анализе физических характеристик процесса и интенсивности теплоотдачи при кипении бинарных неazeотропных смесей.

ОБОЗНАЧЕНИЯ

$K\sigma = \sigma / r\rho'' d_{\text{кр}}$ — безразмерный параметр;
 σ — коэффициент поверхностного натяжения, Н/м;
 r — теплота парообразования, Дж/кг;
 $d_{\text{кр}}$ — размер активной микровпадины поверхности нагрева, м;
 ρ', ρ'' — плотность жидкости и пара, кг/м³;
 $\alpha_{\text{ад}} = \alpha_{22}\xi' + \alpha_{142}(1 - \xi')$ — аддитивное значение коэффициента теплоотдачи для бинарной смеси, Вт/(м²·град);
 α — коэффициент теплоотдачи при кипении бинарной смеси, Вт/(м²·град);
 $\alpha_{22}, \alpha_{142}$ — коэффициенты теплоотдачи при кипении R22 и R142 соответственно, Вт/(м²·град);
 T_w — температура поверхности нагрева, К;
 T_s — температура насыщения, К;
 T_{s0} — температура насыщения для основного объема жидкости, К;
 T_{sw} — температура насыщения жидкости вблизи поверхности нагрева, К;
 ξ'_0 — концентрация НКС для основного объема жидкости, кг/кг;
 ξ'_w — концентрация НКС в жидкой фазе вблизи поверхности нагрева, кг/кг;
 ξ'_* — концентрация НКС в жидкой фазе для условий $\xi'_0 = \xi''_0$;
 ξ''_0 — концентрация НКС в паровой фазе, кг/кг;
 P_s — давление насыщения, МПа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Калнинь И.М., Катерухин В.В., Савицкий И.К. и др. Переход на озонобезопасные хладагенты в условиях России // Холодильная техника. — 1997. — № 1. — С. 17 — 20.

2. **Цветков О.Б.** Хладагенты и экологическая безопасность // Там же. — 1997. — № 1. — С. 20 – 22.
3. **Волошко А.А.** К вопросу об альтернативных хладагентах // Вестник Астраханского гос. техн. ун-та. — 1996. — Вып. 2. — С. 179 – 182.
4. **Филаткин В.Н.** Теплообмен при кипении водоаммиачного раствора // Холодильная техника. — 1957. — № 4. — С. 23 – 29.
5. **Филаткин В.Н.** Теплоотдача при кипении водоаммиачных растворов // Вопр. теплоотдачи и гидравлики двухфазных сред. — М.: Госэнергоиздат, 1961. — 238 с.
6. **Иванов О.П.** Исследование теплообмена при кипении смесей фреона-12 и фреона-22 // Холодильная техника. — 1966. — № 4. — С. 27 – 29.
7. **Лавочник А.И., Шварцман Е.И.** Кипение хладагентов R11 и R142 и их бинарных смесей в большом объеме // Там же. — 1978. — № 12. — С. 20 – 22.
8. **Jungnickel H., Wassilew P., Kraus E.** Investigations on the heat transfer of boiling binary refrigerant mixtures // Int. J. Refrigeration. — 1980. — Vol. 3. — P. 129 – 133.
9. **Gorenflo D., Blein P., Herres G. et al.** Heat transfer during the boiling of R22/R114 mixture // Ibid. — 1988. — Vol. 11, No. 4. — P. 257 – 263.
10. **Шварцман Е.И.** Теплоотдача при кипении смесей в кожухотрубных испарителях хладонных холодильных машин // Тез. Докл. Всесоюз. науч.-практ. конф. “Искусственный холод в отраслях агропромышленного комплекса”. — Кишинев — М., 1987. — С. 36.
11. **Букин В.Г., Шуршев В.Ф., Данилова Г.Н.** Экспериментальное исследование теплообмена при кипении смеси R22/R142В в испарителе холодильной машины // Холодильная техника. — 1996. — № 3. — С. 10 – 11.
12. **Волошко А.А.** Исследование физических характеристик механизма кипения бинарных неазеотропных смесей // Тепломассообмен-ММФ-96. Тепломассообмен в двухфазных системах. Т. 4, ч. 2. — Минск, 1996. — С. 113 – 116.

Статья поступила в редакцию 5 мая 1999 г.