

УДК 536.23

## Теплопроводность Noves 7100 в паровой фазе\*

Е.П. Расчектаева, С.В. Станкус

*Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск*

E-mail: raschektaevaep@gmail.com

Для измерения теплопроводности образца Noves 7100 применялся стационарный метод коаксиальных цилиндров. Эксперименты выполнялись в интервале температур 350–385 К и давлений 0,12–0,21 МПа. Погрешность экспериментальных данных по теплопроводности составляла 1,5–2,5 %, погрешности измерения температуры и давления не превышали 0,05 К и 4 кПа соответственно. Получено обобщающее уравнение для расчета теплопроводности в зависимости от давления и температуры. Определена теплопроводность в идеально-газовом состоянии. Выполнено тестирование ранее разработанного подхода к прогнозированию теплопроводности на основе одного измерения.

**Ключевые слова:** теплопроводность, гидрофторэфир, паровая фаза.

Все возрастающие требования к экологической безопасности хладагентов привели к выходу на рынок новых веществ. Ранее изучаемые авторами хладагенты серии ГФУ (гидрофторуглероды) и смеси на их основе (например, R-32/R-125 (15/85) [1]) постепенно выводятся из обращения из-за имеющегося в них значительного потенциала, способного внести вклад в глобальное потепление. Теплоносители серии Noves являются альтернативными хладагентами нового поколения. Noves 7100 — метокси-нонафторбутан ( $C_4F_9OCH_3$ ), который состоит из двух неразделимых изомеров  $(CF_3)_2CFCF_2OCH_3$  (CAS-номер 163702-06-7) и  $CF_3CF_2CF_2CF_2OCH_3$  (CAS-номер 163702-07-6) и представляет собой бесцветную жидкость. Эта жидкость относится к классу озонобезопасных веществ с низким потенциалом глобального потепления ( $GWP = 320$ ). Noves 7100 применяется не только как заменитель озоноразрушающих хладагентов, но и в качестве чистящего и промывочного агента, растворителя для широкого класса соединений, а также в качестве среды для теплопередачи, испытаний диэлектрической прочности и для проведения химических реакций. Также важно, что метокси-нонафторбутан имеет один из лучших токсикологических профилей среди заменителей фреонов. Он безопасен для человека, практически не оказывает раздражающего воздействия на глаза и кожные покровы, не вызывает мутаций, не влияет на сердечно-сосудистую систему.

\* Работа выполнена в рамках государственного задания ИТ СО РАН 121031800219-2.

Основные физические свойства Novac 7100 следующие: молекулярная масса — 250 г/моль, температура кипения — 61 °С, температура замерзания — -135 °С, плотность жидкости — 1,52 г/мл, давление пара при 293 К равно 26,7 кПа.

Экспериментальные данные по теплопроводности теплоносителя Novac 7100 в настоящей работе получены стационарным методом коаксиальных цилиндров в паровой фазе в относительном варианте. В измерениях использовался образец Novac 7100 компании 3М. Чистота образца составляла 0,9989. До начала измерений образец подвергался множественным циклам замораживание – откачка – разморозка для дегазации. Ввиду высокой температуры кипения (61 °С) Novac 7100 было проведено дополнительное усовершенствование участков измерительной ячейки для поддержания паровой фазы на всех участках установки. Детальное описание методики измерений и проведения эксперимента можно найти в работах [2–4]. Измерительная ячейка состояла из двух вертикальных коаксиальных никелевых цилиндров: внешнего (длиной 140 мм) и внутреннего (длиной 101,3 мм). Ширина кольцевого зазора между цилиндрами равнялась  $0,366 \pm 0,005$  мм. Для измерения температуры цилиндров и разности температур между ними использовались медь-константановые термопары. Влияние свободных концов на значения теплопроводности учитывалось путем введения соответствующих поправок [2]. Установка была откалибрована на аргоне чистотой 99,998 об. %. Расхождение с эталонными данными не превышало 1 %. Перед экспериментом установка вакуумировалась до давления 1,5–2,0 Па. Давление в экспериментах определялось манометрами с погрешностью не более 4 кПа. Погрешность измерения температуры составляла 0,05 К, оцениваемая погрешность измерений теплопроводности — 1,5–2,5 %.

Измерения проводились вдоль трех квазиизотерм в диапазонах температур от 350 до 385 К и давлений от 0,12 до 0,21 МПа. Первичные экспериментальные данные отражены в табл. 1, их обработка была выполнена посредством аппроксимации эмпирической зависимостью [4]:

**Таблица 1**  
Результаты измерений теплопроводности  
Novac 7100 в паровой фазе

$T$ , К	$p$ , МПа	$\lambda$ , мВт/(м·К)
354,92	0,1207	19,06
354,89	0,1211	19,12
355,12	0,1405	19,04
355,19	0,1422	19,07
373,71	0,1295	20,19
373,68	0,1300	20,22
373,74	0,1388	20,30
373,76	0,1525	20,31
373,81	0,1527	20,23
373,97	0,1632	20,10
373,74	0,1674	20,31
373,74	0,1682	20,35
382,81	0,1244	20,81
383,99	0,1481	20,90
383,96	0,1483	20,90
384,07	0,1568	20,91
384,09	0,1614	20,84
382,67	0,1970	20,73
382,72	0,1973	20,77
382,76	0,2035	20,88

$$\lambda(p, T) = a_{00} + a_{10} \frac{T}{100} + a_{20} \frac{100}{T} +$$

$$+ p \left( a_{11} \frac{T}{100} + a_{21} \frac{100}{T} \right) + \quad (1)$$

$$+ p^2 \left( a_{12} \frac{T}{100} + a_{22} \frac{100}{T} \right),$$

где  $T$  — температура в К,  $p$  — давление в МПа,  $\lambda$  — теплопроводность в мВт/(м·К). Коэффициенты уравнения  $a_{ij}$  представлены в табл. 2.

На рис. 1 приведены результаты измерений теплопроводности в паровой фазе в виде квазиизотерм. Среднеквадратичное отклонение экспериментальных значений от сглаженных зависимостью (1) не превышало 0,3 %.

Таблица 2

Коэффициенты уравнения (1)

Индексы коэффициента, $ij$	00	10	20	11	21	12	22
Значение коэффициента, $a_{ij}$	-14,027	2,459	98,239	78,804	-1165,452	-291,487	4301,092

Рис. 1. Изотермы теплопроводности паров Noves 7100.

Символы — экспериментальные данные при 355 (1), 373 (2) и 383 (3) К, линии — аппроксимация (1).

Для теплопроводности в идеально-газовом приближении (при давлении 0,101325 МПа) уравнение (1) переписывается в виде:

$$\lambda_0 = c_1 + c_2 \cdot T + c_3 / T, \quad (2)$$

где  $c_1 = -14,027$ ,  $c_2 = 0,0745$ ,  $c_3 = 2430,83$ .

Полученные экспериментальные данные по теплопроводности Noves 7100 позволили установить возможность применения разработанного в ИТ СО РАН подхода [5] для прогнозирования теплопроводности паров хладагентов (на основе предельных углеводородов) к хладагентам типа Noves, которые относятся к классу эфиров. Ранее этот метод был протестирован на одном из теплоносителей — Noves 7000 [6].

В подходе [5] идеально-газовая теплопроводность хладагентов в приведенных координатах описывается уравнением

$$\lambda_{0r}(T) = 0,0307 + 0,366 \cdot T_r + 0,605 \cdot T_r^2, \quad (3)$$

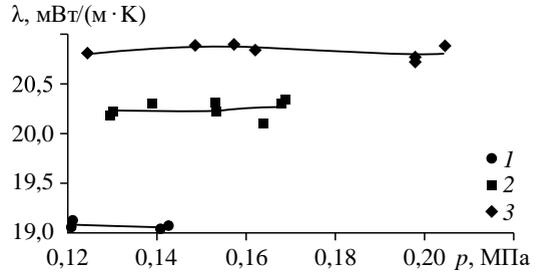
здесь  $T_m = 0,9T_c$  — нормирующая температура,  $T_c$  — критическая температура. В этом уравнении  $T_r = T/T_m$ ,  $\lambda_{0r} = \lambda_0(T)/\lambda_0(T_m)$ . Температура  $T_m = 0,9T_c$  была выбрана в качестве нормирующей, так как определяемая таким образом она находится достаточно далеко от критической точки в удобном для измерений диапазоне положительных температур. Таким образом, уравнение (3) позволяет определить теплопроводность в состоянии идеального газа по однократному измерению теплопроводности пара при  $0,9T_c$  и данным о критической температуре.

Избыточная теплопроводность описывается уравнением

$$\lambda(T, p) - \lambda_0(T) = -0,109 + 14,92 \cdot \rho_r, \quad (4)$$

где  $\rho_r(T, p) = \rho(T, p)/\rho_c$ ,  $\rho_c$  — критическая плотность.

С помощью уравнений (3), (4) и значений плотности из [7] были рассчитаны значения теплопроводности Noves 7100 при параметрах, соответствующих температурам и давлениям из табл. 1. Среднеквадратичное отклонение рассчитанных таким способом значений от экспериментальных данных не превышало 1,8 %, что не превышает суммарные погрешности измерений теплопроводности. Таким образом, рассмотренный подход можно применять для определения теплопроводности жидкостей типа Noves, относящихся к группе эфиров.



### Заключение

Получены новые экспериментальные данные по теплопроводности хладагента Novec 7100 в паровой фазе в интервалах температур 350–385 К и давлений 0,12–0,21 МПа и оценены их погрешности. Также получены зависимость теплопроводности от давления и температуры и уравнение для теплопроводности в состоянии идеального газа. Опробован ранее разработанный подход к прогнозированию теплопроводности на основе единичного измерения.

### Список литературы

1. Расчектаева Е.П., Станкус С.В. Теплопроводность смеси R-32/R-125 (15/85) в паровой фазе // Теплофизика и аэромеханика. 2022. Т. 29, № 6. С. 911–915.
2. Верба О.И., Груздев В.А. Теплопроводность гептафторпропана HFC-227ea // Теплофизика и аэромеханика. 2002. Т. 9, № 3. С. 467–476.
3. Верба О.И., Расчектаева Е.П., Станкус С.В. Теплопроводность хладагента R-415A в паровой фазе // Теплофизика и аэромеханика. 2013. Т. 20, № 4. С. 487–489.
4. Верба О.И., Расчектаева Е.П., Станкус С.В. Теплопроводность смеси R-410A в паровой фазе // Теплофизика и аэромеханика. 2017. Т. 24, № 1. С. 137–141.
5. Raschektaeva E., Stankus S. Thermal conductivity calculation model for refrigerant mixtures in the vapor phase // Intern. J. Thermophys. 2023. Vol. 44, Iss. 5. P. 65-1–65-11.
6. Raschektaeva E.P., Stankus S.V. Experimental study of thermal conductivity of Novec 7000 in vapor phase // J. of Engng Thermophys. 2022. Vol. 31, No. 4. P. 563–566.
7. An B., Duan Y., Yang F., Yang Z. pVT property of HFE 7100 in the gaseous phase // J. Chem. Engng Data. 2015. Vol. 60, No. 11. P. 3289–3295.

*Статья поступила в редакцию 25 июля 2023 г.,  
после доработки — 4 августа 2023 г.,  
принята к публикации 17 августа 2023 г.*