

## СЕКЦИЯ 7 «ХОЛОДИЛЬНАЯ ТЕХНИКА И ТЕПЛОФИЗИКА»

УДК 531.756:534.22:547.5

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЛОТНОСТИ И СКОРОСТИ ЗВУКА NOVEC 7100 В ШИРОКОМ ДИАПАЗОНЕ ПАРАМЕТРОВ СОСТОЯНИЯ

Щемелев А.П., Голубева Н.В., Самуйлов В.С.

Белорусский государственный университет пищевых и химических технологий  
г. Могилев, Республика Беларусь

Жидкости Noves компании 3М представляют собой инженерное химическое соединение на основе фторкетонов и фторсодержащих соединений, которые нашли широкое применение в различных отраслях благодаря своим уникальным свойствам. Эти жидкости разработаны с учётом современных требований к безопасности, экологичности и эффективности. Жидкости Noves имеют низкий потенциал глобального потепления и нулевой потенциал разрушения озонового слоя. Это делает их экологически предпочтительными по сравнению с традиционными хладагентами и огнетушащими веществами, такими как гидрофторуглероды. Они соответствуют международным экологическим стандартам, таким как Киотский и Монреальский протокол. Жидкости Noves применяются в различных отраслях, включая электронику, энергетику, авиацию, автомобилестроение и химическую промышленность. Они используются как хладагенты, растворители, очистители и рабочие жидкости в теплосиловых установках. Noves нетоксичны, не вызывают коррозии и не проводят электроэнергию, что делает их безопасными для использования в помещениях с людьми и чувствительным оборудованием.

Novec 7100 – это 1,1,1,2,2,3,3,4,4-нонафторо-4-метоксибутан, который представляет собой бесцветную, прозрачную жидкость с низкой вязкостью. Ее молекулярная структура включает атомы фтора, что придает жидкости такие свойства, как химическая инертность, термическая стабильность и низкая токсичность. Температура кипения при атмосферном давлении равна 61 °С, температура замерзания - 135 °С. Данная жидкость используется для охлаждения электронных компонентов, таких как процессоры, серверы и силовые модули. Ее высокая диэлектрическая проницаемость позволяет использовать жидкость в системах иммерсионного охлаждения. Noves 7100 применяется в системах газового пожаротушения, где требуется быстрое подавление огня без повреждения оборудования. Она эффективно тушит пожары классов А, В и С. Благодаря своей термической стабильности и низкой вязкости, Noves 7100 применяется в системах теплообмена, где требуется эффективный перенос тепла.

Обзор и анализ экспериментальных работ, посвященных изучению термодинамических свойств, гидрофторэфира Noves 7100 показал, что экспериментальные данные о таких свойствах, как изобарная теплоемкость и изотермическая сжимаемость представлены фрагментарно. Исследования не носят систематического характера. Наиболее исследуемым свойством является плотность исследованная при  $T=275-392$  К и  $p=0.1-140$  МПа. Данные по скорости звука в Noves 7100 в литературе не обнаружены.

Поэтому для создания надежного банка данных по теплофизическим свойствам Noves 7100 необходимо проведение систематических исследований различных её свойств. Данная работа посвящена экспериментальному измерению плотности и скорости звука жидкого Noves 7100 при температурах 298–433 К и давлениях 0,1–100 МПа.

Экспериментальные исследования скорости звука выполнялись на экспериментальной установке, в которой реализован метод непосредственного измерения времени прохождения импульса через исследуемую жидкость. Основным элементом данной установки являлась акустическая ячейка, представляющая собой пьезокерамическую пластину из ЦТС-19 и рефлектора, которые разделены между собой трубкой из нержавеющей стали. Ячейка помещалась в автоклав высокого давления. Температура опыта измерялась при помощи платинового термометра сопротивления ПТС-10М первого разряда. Погрешность измерения температуры не превышала 0,02 К.

Для измерения плотности применялась экспериментальная установка, в которой реализован метод колеблющейся U-образной трубки. Главным элементов установки являлась ячейка с U-образной трубкой Anton-Paar НРМ, работающий в комплекте со вторичным прибором для измерения периода колебаний mPDS 2000 V3.

Давление в автоклаве и U-образной трубке измерялось с использованием грузопоршневого манометра МП-2500 класса точности 0.05.

Выполненные оценки точности измерения плотности и скорости звука показали, что погрешность определения данных свойств соответственно составляет 0.03 и 0.1%.

Используя описанные выше экспериментальные установки были выполнены систематические измерения плотности и скорости звука в жидком Novac 7100 при температурах 298.15–433.15 К давлениях 0.1–100.1 МПа. В ходе эксперимента получено 75 экспериментальных значений плотности и 58 опытных значений скорости звука. Данные по скорости звука для исследуемого вещества получены впервые, а по плотности – впервые в ранее неисследованной области температур (выше 392 К) и давлений.

Полученные значения скорости звука были аппроксимированы уравнением, вид которого удобен для расчета термодинамических свойств

$$\left(\frac{1000}{W}\right)^2 = E_0 + \frac{E_1}{E_2 + \frac{p}{100}} + \frac{E_3}{E_4 + \frac{p}{100}} \quad (1)$$

где  $W$  – скорость звука;

$p$  – давление;

$E_0, E_1, E_2, E_3$  и  $E_4$  – температурные функции.

Температурные функции  $E_0, E_1, E_2, E_3$  и  $E_4$  имеют вид:

$$\begin{aligned} E_0 &= e_{00} + e_{01} \left(\frac{T}{100}\right) \\ E_1 &= e_{10} + e_{11} \left(\frac{T}{100}\right) \\ E_2 &= e_{20} + e_{21} \left(\frac{T}{100}\right) + e_{22} \left(\frac{T}{100}\right)^k \\ E_3 &= e_{30} + e_{31} \left(\frac{T}{100}\right) + e_{32} \left(\frac{T}{100}\right)^n \\ E_4 &= e_{40} + e_{41} \left(\frac{T_{кр} - T}{100}\right) + e_{42} \left(\frac{T_{кр} - T}{100}\right)^m \end{aligned}$$

где  $e_{00}, e_{01}, e_{10}, e_{11}, e_{20}, e_{21}, e_{22}, e_{30}, e_{31}, e_{32}, e_{40}, e_{41}, e_{42}$  – постоянные коэффициенты аппроксимации;

$k, n, m$  – показатели степени;

$T_{кр}$  – критическая температура, К. Для Novac 7100  $T_{кр} = 468,15$  К.

Аппроксимационное уравнение (1) хорошо передает исходные данные по скорости звука во всем исследованном диапазоне температур и давлений. Среднее квадратичное и максимальное отклонения составляют соответственно 0,022 и 0,05 %.