

СКОРОСТЬ ЗВУКА ВО ФРЕОНАХ НА ЛИНИИ НАСЫЩЕНИЯ

С. Г. Комаров, А. Н. Соловьев, Е. П. Шелудяков

(Новосибирск)

Скорость распространения звука в жидкой и паровой фазах фреонов до настоящего времени практически не исследована. Между тем, данные по скорости звука на линии насыщения представляют интерес как с прикладной точки зрения, так и с точки зрения проверки теоретических положений, в частности, для проверки полученной ранее авторами [1] формулы для расчета скорости звука в насыщенных парах. С этой целью нами проведены такие исследования для трех из наиболее распространенных фреонов: Ф-11, Ф-12 и Ф-142.

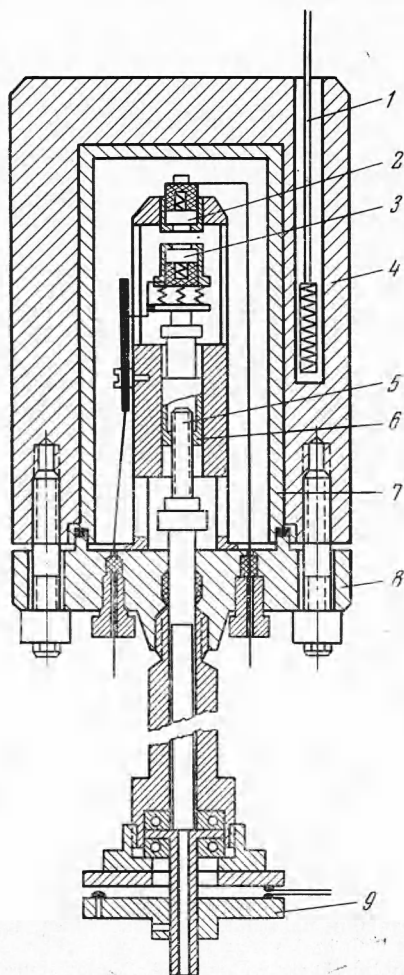
Для экспериментального исследования скорости звука в жидкости и ее насыщенном паре в широком диапазоне изменения температуры, включая критическую область, наиболее удобен метод ультразвукового интерферометра. Метод достаточно точен, позволяет производить исследования с малыми количествами вещества и уже использовался ранее для аналогичных измерений [2,3].

В настоящей работе принят вариант метода с переменным расстоянием при постоянной частоте.

На фиг. 1 показан эскиз рабочей части интерферометра. Излучатель 3 и приемник 2 ультразвука (кристаллы ЦТС) закреплены на опорных столиках кольцами из фторопласта. На нижнем столике излучателя предусмотрены юстировочные винты. Приемник неподвижен, а излучатель перемещается в вертикальном направлении при помощи микрометрического винта 5 и гайки 6. Винт закреплен в двух радиально-упорных подшипниках и вращается реверсивным двигателем ПР. Ввод микрометрического винта снизу позволяет существенно уменьшить высоту столба жидкости над исследуемым объемом (с 130 мм в [2] до 12 мм), и это резко уменьшает влияние гравитационного эффекта при измерениях в околокритической области. Время полного перемещения излучателя на высоту 19 мм составляет 19 мин. Через каждые повороты в измерительную схему подается короткий импульс от дискового контактного датчика 9. Интерферометр помещен в медный автоклав 4 объемом 900 мл, выдерживающий давление до 100 атм. Для предотвращения контакта исследуемого вещества с медью в корпус автоклава запрессована гильза 7 из нержавеющей стали. Крышка автоклава 8, соединительные линии и вся арматура также выполнены из нержавеющей стали. Все прокладки и уплотнения сделаны из фторопласта-4. В стенке автоклава есть сверление 1 для датчика температуры. Автоклав, в свою очередь, помещается в масляный термостат объемом 80 л, температура которого регулируется ртутным контактным термометром.

Общая блок-схема установки приведена на фиг. 2. Электрический сигнал с генератора Г-4-1А 1 частотой 220 кГц, усиленный резонансным усилителем 2, подается на излучатель ультразвука 3, где преобразуется в акустический, проходит через исследуемую среду и принимается приемником ультразвука 4. Принятый акустический сигнал снова преобразуется в электрический, усиливается резонансным усилителем 5 и через детектор 6 подается на электронный самопишущий потенциометр ЭПП-09 7.

Частота сигнала контролируется гетеродинным волномером Ч4-1 8. (Остальные обозначения на схеме: 9 — моторный привод ПР, 10 — микрометрический винт, 11 —



Фиг. 1

термометр сопротивления, 12 — реверсивный переключатель, 13 — миллиамперметр М 193, 14 — магазин сопротивлений Р32, 15 — потенциометр ПМС-48, 16 — образцовая катушка сопротивления 100 ом, а — к баллону с фреоном, б — к насосу.)

Излучатель ультразвука равномерно перемещается относительно приемника. Во время перемещения между излучателем и приемником ультразвука периодически укладывается целое число полуволн; при этом на приемнике меняется напряжение. Это изменение записывается самопишущим потенциометром.

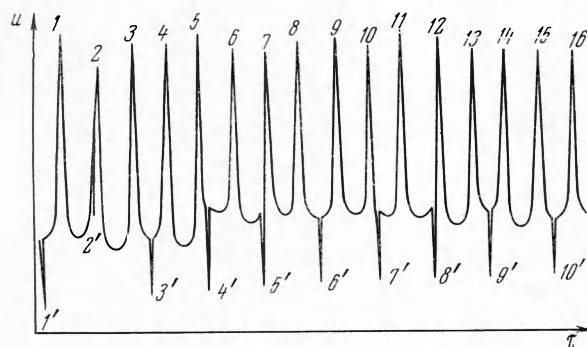
Как показывает анализ записей зависимости напряжения на приемнике от времени, применение самопишущего потенциометра ЭПШ-09, несмотря на большое допустимое время пробега записывающего устройства, не вносит ошибки в определение положения пика и поэтому вполне оправдано.

На фиг. 3 приведена типичная кривая зависимости напряжения на приемнике от времени, полученная в одном из опытов с насыщенным паром Ф-12 ($t = 51.6^\circ \text{C}$, $p = 23.7 \text{ кг/см}^2$, $f = 222.4 \text{ кгц}$). Каждый пик (с 1 по 16) на этой кривой соответствует целому числу полуволн. На кривой видны также метки (с 1' по 10') контактного датчика положения излучателя, позволяющие найти расстояние между приемником и излучателем для каждого пика, т. е. определить длину волны.

Температура автоклава измеряется термометром сопротивления или набором ртутных термометров с ценой деления 0.1°C . Давление измеряется поршневым манометром МП-60 19 класса точности 0.05 в комплекте с образцовым манометром 18. Последний служит для перекрытия интервала между ближайшими значениями давления, соответствующими двум соседним значениям эталонных грузов поршневого манометра, а также для разделения исследуемого вещества и масла поршневого манометра. Конструктивно дифференциальный манометр выполнен в виде камеры со смотровым окном, соединенной с поршневым манометром, и помещенного

внутри камеры образцового манометра класса точности 0.35 на 6 атм, соединенного с объемом автоклава.

Перед заполнением исследуемым веществом вся система тщательно промывалась и вакуумировалась до давления $10^{-2} \text{ мм рт. ст.}$ Первое заполнение осуществляется непосредственно из баллона с фреоном через магистраль а. При этом одновременно может быть заполнен и балластный сосуд 20 с нагревателем, при помощи которого в дальнейшем

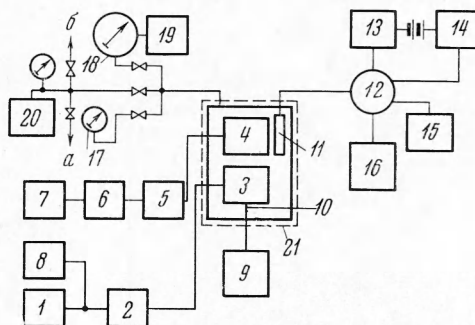


Фиг. 3

можно изменять количество вещества в автоклаве. При измерениях скорости звука в паре уровень жидкости должен быть ниже излучателя, а при измерении в жидкости — выше приемника. В обоих случаях необходима паровая фаза, и наличие ее определяется по совпадению давления насыщения с табличными значениями. В случае, когда уровень жидкости находится между приемником и излучателем, сигнал на приемнике полностью отсутствует. Какая фаза находится в объеме между излучателем и приемником — определяют по величине сигнала на приемнике.

Измерения скорости звука проводились только в стационарном режиме, который устанавливался за 2—3 часа. В этих сериях опытов температура измерялась набором ртутных термометров, а давление — набором образцовых манометров, проградуированных на поршневом манометре. Температура, давление и частота сигнала определялись до и после записи напряжения на приемнике. За время записи температура и давление обычно изменялись не более чем на 0.1%, а частота — на 0.01%.

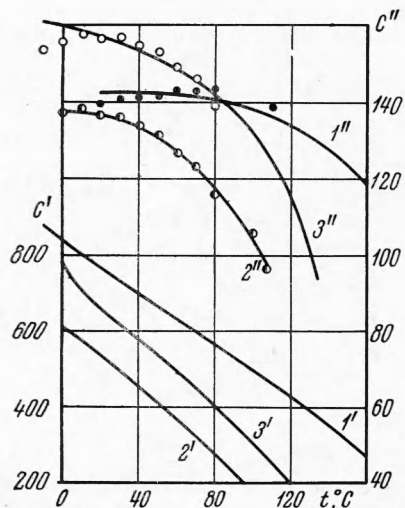
Для каждого фреона было проведено несколько серий измерений с различным количеством вещества и при этом не было обнаружено каких-либо систематических отклонений. Длина волны определялась по записи напряжения на приемнике по способу, использованному в работе [2]. Определяются при помощи масштабных меток ко-



Фиг. 2

ординаты нескольких пиков в начале и конце записи, вычисляется расстояние между соответствующими парами пиков и делится на число полуволн. В расчет принимается среднее арифметическое из этих измерений. Среднее отклонение в длине волны составляет от 0.2 до 0.3%.

Проведены исследования скорости звука в жидкой и паровой фазах по линии насыщения во фреонах Ф-11, Ф-12 и Ф-142 при t от -10 до $+160^\circ \text{C}$ и от $p = 1$ до $p = 43 \text{ атм}$.



Фиг. 4

Изготовленный в ГИПХ Ф-11 был подвергнут хроматографическому анализу. При этом в пределах погрешности метода анализа не было обнаружено никаких примесей. Технические Ф-12 и Ф-142 были подвергнуты многократной дистилляции с отбором средней фракции, затем осушались силикагелем и очищались от неконденсирующихся примесей вакуумированием при -190°C . Во всех случаях зависимость $p-t$ на линии насыщения в пределах точности используемых приборов совпала с табличной [4,5], что может служить косвенным свидетельством достаточной степени чистоты исследованных фреонов.

Результаты измерений скорости звука по сглаженным кривым представлены в табл. 1 и на фиг. 4, на которой кривые 1' — скорость звука в жидкой фазе Ф-11; 2' — скорость звука в жидкой фазе Ф-12; 3' — скорость звука в жидкой фазе Ф-142; 1'' — скорость звука в насыщенном паре Ф-11; 2'' — скорость звука в насыщенном паре Ф-12; 3'' — скорость звука в насыщенном паре Ф-142. Среднее отклонение от интерполирующих кривых составляет 0.4%. На фиг. 4 точками нанесены результаты расчета скорости звука c'' м/сек в насыщенном паре по полученной ранее [1] авторами формуле

$$c = \left[-\xi (v'')^2 \frac{dp''}{dv} \left(\frac{c_p''}{c_v} \right)^{1/2} \right]^{1/2} \quad (1)$$

Таблица 1

Скорость звука в парах c'' и жидкости c' в фреонах [м/сек] на линии насыщения

$t, ^\circ\text{C}$	c'	$t, ^\circ\text{C}$	c''	$t, ^\circ\text{C}$	c'	$t, ^\circ\text{C}$	c''	$t, ^\circ\text{C}$	c'	$t, ^\circ\text{C}$	c''
Ф-11				Ф-12				Ф-142			
-10	883	20	142.3	-4	636.0	5	137.5	-3.8	822.0	-10	160.7
0	844	30	142.5	0	618.8	10	137.6	0	784.0	0	159.9
10	804	40	142.5	10	577.0	20	137.0	10	710.0	10	158.8
20	768	50	142.4	20	534.2	30	135.6	20	662.0	20	157.5
30	733	60	142.2	30	492.4	40	133.5	30	619.0	30	155.6
40	699	70	141.8	40	450.5	50	130.4	40	577.0	40	153.6
50	665	80	141.1	50	408.6	60	126.4	50	534.0	50	151.3
60	632	90	140.0	60	367.0	70	121.5	60	492.0	60	148.7
70	599	100	138.5	70	324.5	80	116.5	70	449.0	70	145.8
80	566	110	136.7	80	278.8	90	111.2	80	405.0	80	142.0
90	531	120	134.5	90	229.0	100	105.3	90	360.0	90	137.5
100	500	130	131.8	100	173.0	108.8	97.0	100	311.0	100	132.2
110	464	140	128.6					110	260.0	110	125.3
120	427	150	124.2					120	204.0	120	115.6
130	390	160	119.2					130	140.0	130	102.6
140	353							133	116.3	134.9	94.6
150	314										
160	273										

Данные $p-v-t$ для расчета были взяты из [4-6].

После анализа немногочисленных данных по c_p / c_v для различных фреонов значение c_p / c_v по линии насыщения было принято постоянным и равным для каждого из фреонов $c_p / c_v = 1.1$. Как видно из фиг. 4, расхождение между рассчитанными и экспериментальными значениями скорости звука в интервале температур от $0.6 T$ до $0.9 T$ (в долях от критической) для всех фреонов не превышает 1%. Это свидетельствует о высокой точности формулы (1) и применимости ее для расчета скорости звука в насыщенных парах фреонов.

Таблица 2

Скорость звука c'' м/сек в насыщенных парах фреонов

$t, ^\circ\text{C}$	c''	$t, ^\circ\text{C}$	c''	$t, ^\circ\text{C}$	c''	$t, ^\circ\text{C}$	c''
Ф-13		Ф-21		Ф-40		Ф-113	
-135	108.6	-37.5	146.2	0	216.5	50	123.7
-130	111.1	-30	148.3	10	217.6	60	124.6
-120	115.2	-20	150.8	20	218.0	70	125.7
-110	118.3	-10	153.6	30	218.0	75	126.0
-100	122.6	0	156.0	40	218.1		
-90	125.4	10	158.2	50	217.5	Ф-114	
-80	127.8	20	160.1	57.5	216.0		
-70	130.0	30	161.3			-35	113.0
-60	130.6	37.5	162.0	Ф-113		-30	114.0
-50	130.4			-25	109.9	-20	115.5
-40	129.6	Ф-40		-20	111.4	-10	117.5
-30	127.0			-10	113.5	0	118.8
-20	123.7	-55	197.5	0	115.7	10	120.2
-10	119.6	-50	201.0	10	117.5	20	121.0
0	113.9	-40	205.0	20	119.2	30	121.4
10	103.1	-30	209.0	30	121.0	40	121.6
20	82.2	-20	212.2	40	122.4	50	122.0
		-10	214.5			55	121.4

Расчеты при температурах выше $0.9 T_*$ не были проведены из-за отсутствия данных по c_p / c_v при этих температурах, ниже $0.6 T_*$ — из-за отсутствия экспериментальных данных по скорости звука. Расхождение между экспериментальными и рассчитанными значениями скорости звука, имеющее место в насыщенных парах Ф-11 и частично в насыщенных парах Ф-142 при низких давлениях, на наш взгляд, вызвано влиянием дисперсии на результаты измерений. Это подтверждается тем, что при частотах и давлениях, близких к настоящим, дисперсия была ранее обнаружена в парах Ф-40 [8]. Кроме того, расчет скорости звука для фреона Ф-11 при 20°C по формуле для идеального газа дает заниженный по сравнению с экспериментом результат. По формуле (1) нами были рассчитаны скорости звука в насыщенных парах для пяти фреонов: Ф-40, Ф-13, Ф-21, Ф-113 и Ф-114. Результаты этого расчета приведены в табл. 2. Данные p - v - t для расчета были взяты из литературы [8,7]; c_p / c_v принято постоянным и равным 1.1.

Поступила 15 6 1967

ЛИТЕРАТУРА

- Соловьев А. Н., Шелудяков Е. П. Скачок термодинамической скорости звука и определение некоторых параметров насыщенных паров. ПМТФ, 1967, № 3.
- Новиков И. И., Трелин Ю. С. Скорость звука на кривой фазового равновесия «пар — жидкость». ПМТФ, 1960, № 2.
- Радовский И. С. Экспериментальное исследование скорости звука в аргоне на линии насыщения. ПМТФ, 1963, № 3.
- Холодильная техника. Энциклопедический справочник, кн. I. Госторгиздат, 1960.
- Fundamentals and Equipment, Copyright by the American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc. (ASHRAE), New York, 1965 and 1966.
- Бадилькес И. С. Рабочие вещества и процессы холодильных машин. Госторгиздат, 1962.
- Розенфельд Л. М., Ткачев А. Г. Холодильные машины и аппараты. Гостехиздат, 1960.
- Rossing I. D., Legvold S. Collision excitation of molecular vibrations in halogen-substituted methanes, J. Chem., Phys. 1955, 23, 1118.