

УДК 534.1

НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ СКОРОСТИ ЗВУКА В ЖИДКОМ АММИАКЕ

М. Я. АНДРЕЕВ, И. Л. РУБАНОВ, **Ю. И. ФЛЕЕР**

ОАО Концерн “Океаприбор”, Санкт-Петербург, Российская Федерация

Получено 27.07.2008

Даны результаты экспериментальных исследований температурной зависимости скорости звука в жидком аммиаке.

Наведені результати експериментальних досліджень температурної залежності швидкості звуку в рідкому аміаку.

Some results of experimental studying of the temperature dependence of sound velocity in the ammoniak are presented.

ВВЕДЕНИЕ

Аммиак жидкий технический широко применяется в различных областях промышленности и сельском хозяйстве. Аммиак марки А используется для выработки азотной кислоты, азотирования, создания защитных атмосфер, в качестве хладагента. Аммиак марки Б применяется для производства азотных удобрений и непосредственного внесения в почву [1]. В связи с токсичностью и взрывоопасностью этого соединения, а также ужесточением требований экологии и промышленной безопасности [1–3] при его производстве и транспортировке широко используются неконтактные контрольно-измерительные приборы (КИП), в том числе и ультразвуковые. Ультразвуковые измерители уровня УЗУ-2 и УЗУ-2Т и системы на их основе успешно эксплуатируются в составе технологических линий приемки, хранения и отгрузки аммиака на ряде предприятий Российской Федерации, Республики Беларусь, Республики Литва [4–8]. Одним из достоинств таких устройств является возможность их демонтажа для периодических проверок, технических проверок, регламентных работ, ремонта без выведения из эксплуатации емкости или резервуара, на котором установлены датчики.

Для эффективного применения ультразвуковых измерителей уровня необходимы подробные данные о влиянии различных факторов на скорость звука в жидком аммиаке. В этой статье приведены результаты экспериментальных исследований температурной зависимости указанной величины.

1. ТЕОРИЯ

В работе [9] в результате решения уравнения состояния для скорости звука в аммиаке получена

Табл 1. Температурная зависимость скорости звука a , м/с по [9]

$t^{\circ}\text{C}$	p , бар					
	0.1	1	2	5	10	15
–73	1700	1700	1700	1700	1700	1710
–63	367*	1680	1680	1680	1680	1690
–53	376	1650	1650	1650	1660	1660
–43	384	1620	1620	1620	1630	1630
–33	392	387*	1590	1590	1590	1600
–23	400	396	1550	1550	1550	1560
–13	408	404	400*	1500	1500	1510
–3	415	412	408	1450	1460	1460
7	422	419	416	406*	1400	1410
17	429	427	424	415	1340	1350
27	436	434	431	423	408*	1290
37	443	441	439	432	419	1220

* – переход аммиака в газовую фазу.

следующая формула:

$$a_t = \sqrt{RT_{\text{кр}}\tau K Z}. \quad (1)$$

Здесь R – постоянная Клайперона; $T_{\text{кр}}$ – абсолютная температура в критической точке; τ – приведенная температура; K – объемный показатель изоэнтропы; Z – коэффициент сжимаемости. В табл. 1 приведены расчетные значения скорости звука в зависимости от давления p , бар [9].

В достаточно широком диапазоне температур и давлений скорость звука в жидком аммиаке может быть аппроксимирована выражением

$$a_t = -2.54 \cdot 10^{-2} t^2 - 5.477 t + 1437.4, \quad (2)$$

где t – температура аммиака в $^{\circ}\text{C}$.

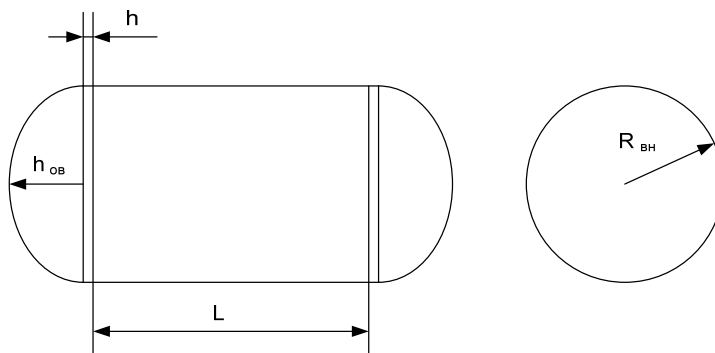


Рис. 1. Общий вид котла железнодорожного вагона-цистерны

Табл. 2. Основные габаритные размеры вагона-цистерны

Измерение	Модель 15-1440	Модель 15-1597
Внутренний радиус котла, $R_{\text{вн}}$, м	1.3	1.5
Длина цилиндрической обечайки, L , м	9.184	9.55
Внутренняя высота овалоидной части днища, $h_{\text{ов}}$, м	0.72	0.83
Высота цилиндрической части котла, h , м	0.074	0.080

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ

В реальных условиях жидкий аммиак содержит воду, железо, растворенный газ [1]. При этом количество примесей во многом определяется технологическими процессами его изготовления и транспортировки. В связи с этим в процессе пусконаладочных работ на сливо-наливных эстакадах предприятий-заказчиков возникла необходимость в изучении реальной температурной зависимости скорости звука в жидком аммиаке. Исследования проводились с помощью прибора УЗУ-2 [4] для железнодорожных вагонов-цистерн наиболее употребляемых типов – моделей 15-1440 (ац30т) и 15-1597 (ац43т) [10]. Эскиз котла цистерны приведен на рис. 1, а основные габаритные размеры – в табл. 2. Коллектор (аммиакопровод) на выходе оборудовался датчиком температуры, а температура продукта в течение всего процесса налива (слива) изменялась не более, чем на 1°C .

С помощью реперного акустического канала прибора УЗУ-2 определялось время прохождения импульса по диаметру цистерны $\tau_{\text{и}}$ и вычислялась скорость звука по формуле

$$a = \frac{4R_{\text{вн}}}{\tau_{\text{и}}}. \quad (3)$$

При этом предполагалось, что внутренний радиус котла $R_{\text{вн}}$ соответствует данным табл. 2.

Основная погрешность измерения температуры применявшимися датчиками составляла не более $\Delta t = \pm 0.5^\circ\text{C}$, а аппаратная погрешность измерения временного интервала прибором УЗУ-2 – $\Delta \tau = \pm 1$ мкс. В процессе измерений в серии по $n \geq 10$ тестов вычислялись средние значения скорости звука $\bar{a}$ и среднеквадратическое отклонение S суммарной относительной погрешности измерений.

При сопоставлении результатов, полученных для одной температуры продукта, но в различных условиях (зима/лето, сливо-наливные эстакады в Перми, Березниках, Гродно, Йонаве и др.), нами проводилась проверка гипотезы равенства средних значений скорости звука [11,12]

$$\begin{aligned} H_0 : \quad \bar{a}_1 &= \bar{a}_2, \\ H_1 : \quad \bar{a}_1 &\neq \bar{a}_2, \end{aligned} \quad (4)$$

где $\bar{a}_1$ и $\bar{a}_2$ – истинные средние значения измеренных величин.

Принятие нулевой гипотезы означало, что результаты измерений скорости звука в жидком аммиаке (при одной и той же температуре, но в различных условиях эксплуатации) совпадает в статическом смысле с доверительной вероятностью

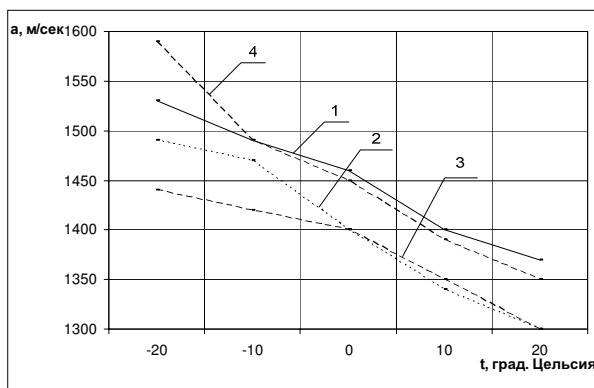


Рис. 2. Температурная зависимость скорости звука в жидком аммиаке:

- 1 – теоретическая зависимость [9];
 2 – отстоявшийся аммиак, длительное время находившийся в цистерне и поступавший в хранилище непосредственно из нее;
 3 – аммиак, поступивший в цистерну по аммиакопроводу непосредственно из агрегата;
 4 – аммиак, поступивший в цистерну по аммиакопроводу из изотермического хранилища

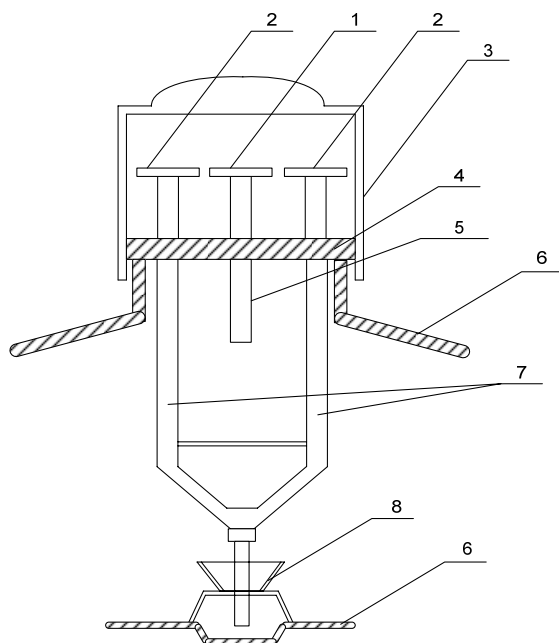


Рис. 3. Наливной и сливной узел аммиачной цистерны:

- 1 – вентиль для газообразного аммиака;
 2 – вентиль для жидкого аммиака;
 3 – защитный колпак для крышки с арматурой;
 4 – крышка люка цистерны; 5 – трубка;
 6 – котел цистерны; 7 – сифонные трубы;
 8 – воронка для установки сифонных труб

Р. Критерием ее проверки является статистика

$$t_0 = \frac{\bar{a}_1 - \bar{a}_2}{\sqrt{\frac{S_1^2}{n_1} + \frac{S_2^2}{n_2}}}, \quad (5)$$

где $\bar{a}_1$ и $\bar{a}_2$ – истинные средние значения скорости звука; n_1 и n_2 – объемы выборок для определения средних значений $\bar{a}_1$ и $\bar{a}_2$; S_1 и S_2 – выборочные среднеквадратические отклонения суммарной относительной погрешности измерений. Индексы 1 и 2 соответствуют измерениям при первых и вторых условиях.

Критерий отклонения нулевой гипотезы равенства средних значений выражается условием

$$|t_0| > t_{\alpha/2; \nu}, \quad (6)$$

где $t_{\alpha/2; \nu}$ – верхняя $\alpha/2$ -процентная точка t -распределения с ν степенями свободы, которые определяются из соотношения

$$\nu = \frac{\left(\frac{S_1^2}{n_1} + \frac{S_2^2}{n_2}\right)^2}{\frac{1}{n_1 + 1} \left(\frac{S_1^2}{n_1}\right)^2 + \frac{1}{n_2 + 1} \left(\frac{S_2^2}{n_2}\right)^2} - 2. \quad (7)$$

Величина α дает уровень значимости рассматриваемого критерия. Значения верхней $\alpha/2$ -процентной точки t -распределения с ν степенями свободы $t_{\alpha/2; \nu}$ приведены в работе [12].

Сравнение результатов измерений скорости звука в условиях различных регионов (Пермь, Березники, Йоонава, Гродно) и сезонов показали, что уровень значимости во всех случаях удовлетворял условию $\alpha \leq 0.11$. Это означает совпадение полученных результатов с вероятностью $P \geq 0.9$.

Типовые результаты измерений температурной зависимости скорости звука в жидком аммиаке для трех случаев приведены на рис. 2. Несложно заметить, что наиболее близка к теоретической зависимости (2) скорость звука в аммиаке, поступившем в цистерну по аммиакопроводу из изотермического хранилища. При этом измеренные значения несколько выше, чем теоретические. По нашему мнению, отмеченное расхождение вызвано наличием в жидком аммиаке растворенного газа. Так, по условиям технологического процесса изготовления аммиака на выходе агрегата может содержать до 20 % газовой фазы.

Что же касается аммиака, поступившего непосредственно из железнодорожной цистерны, следует отметить, что его слив осуществляется следующим образом (рис. 3). Газообразный аммиак

ак под давлением подается в газоотводную трубку 5 сливо-наливного узла цистерны и выдавливают жидкую фазу через сифонные трубы 7 в коллектор. В результате неизбежно попадание некоторого дополнительного количества газа в жидкий аммиак, вызывающее изменение его акустических свойств.

ВЫВОДЫ

Получены экспериментальные данные, уточняющие зависимости скорости звука от температуры жидкого аммиака при различных условиях слива-налива железнодорожных вагонов-цистерн. По нашему мнению, эти результаты позволят более эффективно эксплуатировать ультразвуковые приборы контроля уровня.

1. ГОСТ 6221-90. – Аммиак жидкий технический. Технические условия.
2. ГОСТ Р 51330.19-99. – Электрооборудование взрывозащищенное. Данные по горючим газам и парам, относящиеся к эксплуатации электрооборудования.
3. ПБ О 9-170-97. – Общие правила взрывобезопасности для взрывопожароопасных химических, нефтехимических и нефтеперерабатывающих производств.
4. Андреев М. Я., Корякин Ю. А., Рубанов И. Л. Ультразвуковые уровнемеры УЗУ-2 и УЗУ-2Т // Датчики и системы. – 2002. – N 1. – С. 35–37.
5. Андреев М. Я., Гончаров А. А., Рубанов И. Л. Некоторые результаты промышленных испытаний ультразвукового уровнемера УЗУ-2Т // Гидроакустика. – 2003. – Вып. 4. – С. 91–93.
6. Андреев М. Я., Корякин Ю. А., Рубанов И. Л., Флеер Ю. И. Применение ультразвуковых уровнемеров и систем на их основе для обеспечения экологической безопасности // Форум “Топливно-энергетический комплекс России. Региональные аспекты”. – Санкт-Петербург, 2003. – С. 74.
7. Андреев М. Я., Дмитриев И. Н., Корякин Ю. А., Рубанов И. Л. Системы контроля уровня на основе ультразвуковых уровнемеров УЗУ-2 // Датчики и системы. – 2004. – N 5. – С. 46–48.
8. Андреев М. Я., Рубанов И. Л., Флеер Ю. И. Исследование работы ультразвукового уровнемера УЗУ-2 в процессе налива-слива железнодорожных цистерн теплым газосодержащим аммиаком // Гидроакустика. – 2007. – Вып. 7. – С. 33–35.
9. Голубев И. Ф., Кияшева В. П., Перельштейн И. М., Парушин Е. Б. Теплофизические свойства аммиака. – М.: Изд-во стандартов, 1978. – 264 с.
10. Специализированные цистерны для перевозки опасных грузов. – М.: Изд-во стандартов, 1993.
11. Леман Э. Проверка статистических гипотез. – М.: Наука, 1964. – 297 с.
12. Монтгомери Д. К. Планирование эксперимента и анализ данных. – Л.: Судостроение, 1980. – 384 с.