

ВЯЗКОУПРУГИЕ СВОЙСТВА СЫВОРОТКИ КРОВИ

Руденко А.П., Саенко Р.О., Саенко О.В.

Полтавский национальный педагогический университет им. В.Г. Короленко

*ул. Остроградского, 2, г. Полтава, 36000, Украина**e-mail: roman-saenko89@mail.ru*

Аннотация. В работе представлены результаты экспериментального исследования плотности, вязкости, амплитудного коэффициента поглощения и скорости распространения ультразвука в сыворотке крови поросят. На основании полученных данных, с использованием теории Эйринга, проведены расчет энthalпии, энтропии, а также свободной энергии активации вязкого течения. Рассчитаны величины классического поглощения и адиабатической сжимаемости. Установлено наличие релаксационного процесса в диапазоне частот $10 \div 100$ МГц.

Ключевые слова: вязкое течение, акустическая релаксация, адиабатическая сжимаемость, кинетический компенсационный эффект.

VISCOELASTIC PROPERTIES OF BLOOD SERUM

Rudenko A.P., Saienko R.O., Saienko O.V.

V.G. Korolenko Poltava National Teacher Training University

*Ostrogradskiy St., 2, Poltava, 36000, Ukraine**e-mail: roman-saenko89@mail.ru*

Abstract. The paper presents the results of an experimental study of density, viscosity, the amplitude of the absorption coefficient and the ultrasound propagation velocity in the blood serum of piglets. Based on these data, using the theory of Eyring, the calculation of enthalpy, entropy and free energy of activation of viscous flow was held. We have calculated the magnitude of the classical absorption and adiabatic compressibility. It was also established the presence of the relaxation process in the frequency range of $10 \div 100$ MHz.

Key words: viscous flow, acoustic relaxation, the adiabatic compressibility, kinetic compensation effect.

Для изучения механизмов неравновесных процессов, протекающих в жидкостях и различного рода жидкостных системах, широко применяются спектроскопические методы. Среди всех существующих методов особое место принадлежит акустической спектроскопии, позволяющей регистрировать и изучать быстрые и сверхбыстрые процессы с характерными временами $10^{-6} \div 10^{-12}$ с [1]. Применение методов неравновесной термодинамики при анализе акустических спектров позволяет определять кинетические и термодинамические параметры динамических процессов, происходящих при тепловом движении, установить связь между строением, теплофизическими и кинетическими свойствами жидкостей и жидкостных систем.

Ранее [2, 3] нами проводились исследования сыворотки крови людей с онкологическими заболеваниями желудка. Данное исследование посвящено изучению акустических и вязкоупругих свойств сыворотки крови животных, не имеющих каких-либо явных заболеваний и отклонений в развитии. Его целью является поиск общих физических закономерностей в поведении параметров акустической релаксации в сыворотке крови живых организмов.

В качестве объекта исследования была взята сыворотка крови поросят 8 месяцев жизни. Забор крови производился ветеринарным врачом. Отобранные образцы выдерживались на протяжении $6 \div 7$ часов при температуре $5 \div 6^\circ\text{C}$. Сыворотка отделялась от осевших форменных элементов крови, после чего дальнейшее устранение не осевших частиц проводили в центрифуге ОПН – 8 при 2000 об/мин на протяжении 45 минут.

Нами проведены измерения плотности ρ , вязкости η_s , амплитудного коэффициента поглощения αf^2 и скорости распространения звука c в сыворотке крови поросят в интервале температур $283 \div 313$ К.

Измерения плотности проводили пикнометрическим методом с погрешностью 0,5 %, кинематическую вязкость измеряли с помощью капиллярного вискозиметра с погрешностью $0,5 \div 2$ % согласно методик, описанных в [4]. Измерения акустических параметров проводили импульсно-фазовым методом переменного расстояния. Амплитудный коэффициент поглощения определяли в интервале частот $10 \div 100$ МГц с погрешностью $2 \div 10\%$, а скорость распространения звука с погрешностью 0,5 %. Методика исследований детально описана в [5]. Температуру поддерживали с точностью 0,1 К при помощи жидкостного ультратермостата УТ-15. Все необходимые взвешивания выполнялись на аналитических весах ВЛА – 200М.

Результаты экспериментальных исследований плотности, вязкости и скорости распространения звука в сыворотке крови представлены в таблице 1.

Анализируя данные таблицы 1 видим, что плотность сыворотки крови уменьшается при повышении температуры. Уменьшение плотности происходит не линейно, а имеет квадратичную зависимость. Вязкость уменьшается при повышении температуры по экспоненциальному закону. Полученные нами значения плотности и вязкости хорошо согласуются с данными других авторов.

Скорость звука в сыворотке, в исследованном интервале температур возрастает, подобное поведение характерно для воды и большинства водных растворов невысоких концентраций.

Зная значения плотности, кинематической вязкости и скорости распространения ультразвука, нами были рассчитаны значения классического поглощения и адиабатической сжимаемости при помощи соотношений [6]:

Таблица 1 – Плотность, вязкость, скорость распространения звука, величина классического поглощения и адиабатическая сжимаемость сыворотки крови поросят

T, K	ρ , кг/м ³	η , мПа·с	c, м/с	β_s , 10 ⁻¹⁰ Па ⁻¹	$\alpha_{\text{class}} f^{-2}$, 10 ⁻¹⁵ м ⁻² ·с
283	1028,4	2,19	1477	4,46	17,5
293	1026,5	1,71	1512	4,26	12,6
303	1022,9	1,34	1539	4,13	9,4
313	1019,2	1,09	1554	4,06	7,5

$$\alpha_{\text{class}} \cdot f^{-2} = 26.3 \frac{\eta_s}{\rho c_0^3} \text{ и } \beta_s = \frac{1}{\rho c_0^2}.$$

Полученные результаты представлены в таблице 1.

Известно, что для описания температурной зависимости коэффициента динамической вязкости, а также расчёта термодинамических характеристик вязкого течения используется теория Эйринга [7], согласно которой:

$$\eta_s = \frac{hN_a}{V_i} \exp\left(\frac{\Delta G_\eta^\ddagger}{RT}\right) = \frac{hN_a}{V_i} \exp\left(-\frac{\Delta S_\eta^\ddagger}{R}\right) \exp\left(\frac{\Delta H_\eta^\ddagger}{RT}\right),$$

где h – постоянная Планка; N_a – постоянная Авогадро; χ – трансмиссионный коэффициент, значение которого неизвестно, поэтому принимается равным единице; V_m – молярный объём раствора; ΔG_η^\ddagger – свободная энергия активации вязкого течения; R – универсальная газовая постоянная; ΔS_η^\ddagger и ΔH_η^\ddagger – энтропия и энтальпия активации вязкого течения соответственно.

Для определения величины свободной энергии активации вязкого течения первое уравнение преобразуют к виду:

$$G_\eta^\ddagger = RT \ln\left(\frac{\eta_s V_m}{hN_a}\right) = RT \ln\left(\frac{v\mu}{hN_a}\right).$$

Для определения величины энтальпии ΔH_η^\ddagger пользуются экспериментальными данными о кинематической вязкости и рассчитывают по формуле:

$$\Delta H_\eta^\ddagger = R \frac{\partial \ln(v)}{\partial (T^{-1})}.$$

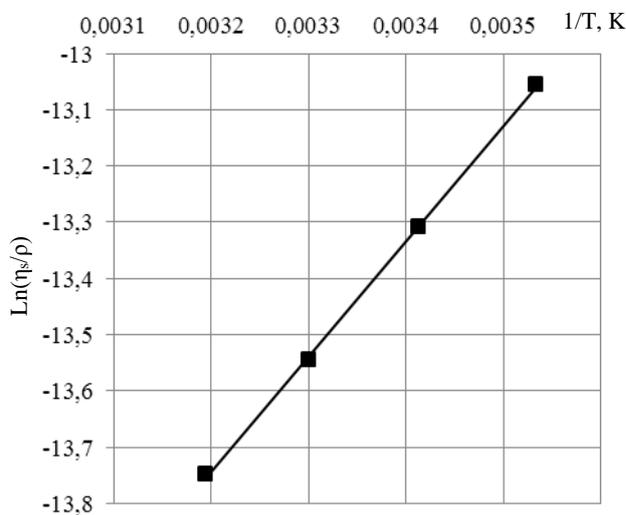


Рисунок 1 – Зависимость величин $\ln(\eta_s/\rho)$ от T^{-1}

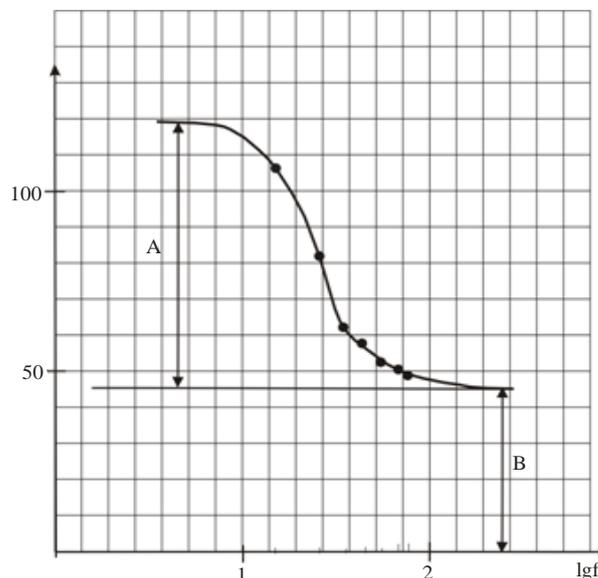


Рисунок 2 – Зависимость поглощения звука от частоты

Из рисунка 1 видно, что зависимость логарифма кинематической вязкости от обратной температуры носит линейный характер. Поэтому, энтальпию можно рассчитать по тангенсу угла наклона прямой $\ln(v)$ к оси (T^{-1}) .

Величину энтропии рассчитывают по формуле $\Delta S_\eta^\ddagger = \frac{\Delta H_\eta^\ddagger - \Delta G_\eta^\ddagger}{T}$. Рассчитанные значения энтропии, энтальпии и свободной энергии активации вязкого течения представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Значения энтальпии, энтропии и свободной энергии вязкого течения сыворотки крови поросят

$\Delta H_{\eta}^{\ddagger}$, кДж/моль	$\Delta S_{\eta}^{\ddagger}$, Дж/моль·К	G_{η}^{\ddagger} , кДж/моль
17,0	10,5	21,2

Следует отметить, что величины энтропии и свободной энергии активации при таком подходе называют эмпирическими [8], поскольку они зависят от трансмиссионного коэффициента χ , значение которого неизвестно. Для его нахождения можно воспользоваться значением изокINETической температуры или воспользоваться теорией компенсационного эффекта. Но для сыворотки крови значение изокINETической температуры неизвестно, а для применения теории компенсационного эффекта не хватает данных. По этой причине пока что невозможным остается рассчитать значения истинных величин энтропии и свободной энергии активации вязкого течения сыворотки крови.

Во всех исследованных образцах сыворотки крови наблюдалась зависимость величины поглощения звука от частоты – акустическая релаксация. Зависимость величин αf^{-2} описывается уравнением с одним временем релаксации:

$$\alpha \cdot f^{-2} = \frac{A_1}{1 + (f/f_{1p})^2} + B.$$

На рисунке 2 приведены зависимости величин поглощения αf^{-2} от логарифма частоты для сыворотки крови при температуре 313 К. По экспериментальных данных проведены расчёты параметров A_1 и B акустической релаксации, а также времени релаксации f_{1p} . Полученные нами значения соответственно равны $84 \cdot 10^{-15} \text{ м}^{-1}\text{с}^2$; $39,4 \cdot 10^{-15} \text{ м}^{-1}\text{с}^2$ и 27,1 МГц.

Выполненные нами расчёты показали, что значение высокочастотной области релаксации B больше, чем поглощение, обусловленное сдвиговой вязкостью, то есть $B > \alpha f^{-2}$. Это свидетельствует о том, что релаксационный процесс, который мы наблюдаем, не охватывает области изменения всей объёмной вязкости и в области более высоких частот, существует другой или другие процессы, обусловленные релаксацией как объёмной, так и сдвиговой вязкости.

Список литературы / References:

1. Шахпаронов М.И. *Механизмы быстрых процессов в жидкостях*. М.: Высш. шк., 1980, 352с. [Shakhparonov M.I. *The mechanisms of fast processes in liquids*. Moscow: High. School, 1980, 352 p. (In Russ.)]
2. Москаленко О.В., Заливчий В.М., Калаптурівський В.М., Саенко О.В. Синдром ендогенної інтоксикації та акустичні методи його реєстрації. *Проблеми екології та медицини*. Полтава: УМСА, 1999, т. 3, № 5, с. 75-78. [Moskalenko O.V., Zalivchij V.M., Kalapturivskij V.M., Saenko O.V. The syndrome of endogenous intoxication and acoustic methods of its registration. *Problemi ekologії ta medicini*. Poltava, 1999, vol. 3, no. 5, pp. 75-78. (In Ukr.)]
3. Москаленко О.В., Мокляк В.І., Руденко О.П., Саенко О.В., Тимошенко О.В. Динамічне спостереження за рівнем ендотоксикозу у хворих на рак шлунка. *Матеріали X з'їзду онкологів України*. К.: ІО АМН України, 2001, с. 121. [Moskalenko O.V., Moklyak V.I., Rudenko O.P., Saenko O.V., Timoshenko O.V. Dynamic observation on the level of endotoxicosis in patients with gastric cancer. *Materials X congress of oncologists Ukraine*. Kyiv: ІО АМН Ukraine, 2001, p. 121. (In Ukr.) (In Russ.)]
4. Чолпан П.Ф., Гаркуша Л.Н. *Экспериментальные методы определения плотности и вязкости жидкостей*: метод. рекоменд. [для студентов физических специальностей вузов]. К., 1987, 20 с. [Cholpan P.F., Garkusha L.N. *Experimental methods for determining the density and viscosity of liquids*. *Metodichni rekomendacii dlya studentov fizicheskix specialnostej vuzov*. Kyiv, 1987, 20 p. (In Russ.)]
5. Руденко О.П., Сперкач В.С. *Экспериментальные методы визначення поглинання звуку в рідинах*. Методичні рекомендації для студ. фізичн. спеціальностей. Полтава, 1992, 68 с. [Rudenko O.P., Sperkach V.S. *Experimental methods for determining the absorption of sound in liquids*. *Metodichni rekomendacii dlya studentiv fizichnix specialnostej*. Poltava, 1992, 68 p. (In Russ.)]
6. Михайлов И.Г., Соловьев В.А., Сырников Ю.П. *Основы молекулярной акустики*. М.: Наука, 1964, 516 с. [Mixajlov I.G., Solovev V.A., Syrnikov Yu.P. *The fundamentals of Molecular Acoustics*. Moscow: Nauka, 1964, 516 p. (In Russ.)]
7. Глестон С., Лейдер К., Эйринг Г. *Теория абсолютных скоростей реакций*. М.: ИЛ, 1948, 581 с. [Gleston S., Leider C., Eyring H. *The theory of absolute reaction rates*. Moscow: Inostrannaya literature, 1948, 581 p. (In Russ.)]
8. Шахпаронов М.И., Асташенко Е.П. О механизмах теплового движения молекул в жидких спиртах. *Журнал физической химии*. 1979, т. LIII, № 5, с. 1098-1102. [Shakhparonov M.I., Astashenko E.P. About mechanisms of the thermal motion of molecules in a liquid alcohol. *Journal of Physical Chemistry*, 1979, vol. LIII, no. 5, pp. 1098-1102. (In Russ.)]