

УДК 612.664.1

ПАРАМЕТРЫ ДИНАМИЧЕСКОГО ПОВЕРХНОСТНОГО НАТЯЖЕНИЯ РАСТВОРОВ БЕЛОК–ЛИПИД–СОЛЬ КАК СИСТЕМ, МОДЕЛИРУЮЩИХ ПЛАЗМУ КРОВИ

С.Ю. Зайцев

(кафедра химии, ФГБОУ ВО МГАВМиБ – МВА имени К.И. Скрябина;
e-mail: szaitsev@mail.ru)

Измерения динамического поверхностного натяжения (ДПН) жидкостей является одним из наиболее простых и быстрых методов для анализа различных химических растворов и биологических жидкостей. Исследованы растворы трехкомпонентных систем на основе бычьего сывороточного альбумина (БСА), природного фосфатидилхолина (ФХ) и хлорида натрия. Установлено, что в области малых промежутков времени (0,1–1,0 с) основное влияние оказывает содержание соли (особенно в высоких концентрациях), а в области средних и больших промежутков времени (более 1,0 с) – концентрация БСА, тогда как изменения концентрации ФХ (в пределах, обнаруживаемых в крови) оказывают незначительное влияние на большинство параметров ДПН. Наиболее информативными (из семи изученных параметров ДПН) являются изменения (на 22–68%) величин наклона тензиограмм λ_0 , λ_1 и λ_2 . Это позволило определить диапазоны оптимальных концентраций: БСА (60–80 г/л), ФХ (1–4 мМ), NaCl (130–150 мМ) в смеси, что соответствует их содержанию в плазме крови человека и животных. Для четырех параметров σ_1 ... σ_4 обнаружены только небольшие корреляции с изменением соотношения трех компонентов в смеси. Полученные закономерности важны как для дополнения фундаментальных баз данных, так и для прогностического моделирования в биологии и медицине.

Ключевые слова: растворы, бычий сывороточный альбумин, фосфатидилхолин, динамическое поверхностное натяжение, плазма крови.

Методы измерения динамического поверхностного натяжения (ДПН) все шире применяются в коллоидной и физической химии для изучения не только водных растворов синтетических ПАВ [1, 2], но и различных биологически-активных веществ (БАВ) [2, 3], в том числе компонентов плазмы крови человека и животных [4–6]. В данной статье нет возможности обсуждать многочисленные работы по определению статического и динамического поверхностного натяжения (ДПН) растворов индивидуальных БАВ, тем более, что они цитируются в работах по смесям БАВ [7, 8], причем наш интерес вызывали исследования систем на основе бычьего сывороточного альбумина (БСА) и липидов [8–11]. Очень интересны вопросы о нативности или разворачивании макромолекул белков (типа БСА), индуцированным анионными ПАВ (типа додецилсульфатом натрия), которые были подробно изучены в работах [9–11] методами флюоресцентной и абсорбционной спектроскопии, электронного спинового резонанса, малоуглового рентгеновского рассеяния и др. Большой интерес вызывают работы по определению ДПН систем на основе альбуминов сыворотки крови человека [12, 13] и молока [14,

15], лактоглобулинов [14, 15] и казеинов [16]. Особое внимание в последнее время привлекает изучение разнообразных комплексов липидов, белков и других БАВ – основных компонентов плазмы крови. Поэтому в данном кратком обзоре литературы приведем только несколько работ последних лет, касающихся исследования липопротеинов как природных липид-белковых частиц плазмы крови человека и животных. Например, в работе [17] изучен аполипопротеин А-I (АпоА-I), который является важной составляющей липопротеинов высокой плотности (ЛПВП) и участвует в накоплении сложного эфира холестерина в ЛПВП. Для того чтобы понять поведение АпоА-I на гидрофобной поверхности липопротеина, использовали тензиометрию многокомпонентных систем. В частности, изучали его связывание с гидрофобной поверхностью в таких системах, как триолеин–вода (ТО–В) и пальмитоилолеоил–фосфатидилхолин–триолеин–вода (ТО–ПОФХВ). Авторами показано [17], что при связывании АпоА-I с указанными системами поверхностное натяжение уменьшается на ~16–18 мН/м. Максимальное поверхностное давление, при котором АпоА-I начинает десорбироваться с гидрофобной поверхно-

сти в системах ТО–В и ТО–ПОФХ–В составляло 16,8 и 20,7 мН/м соответственно [17]. В работе [18] изучены межфазные свойства аполипопротеинов В292-593 (В6.4-13) и В611-782 (В13-17) на границе раздела ТО–В для анализа их взаимодействия с триацилглицерином во время сборки липопротеинов. Установлено, что В13-17 связывается с поверхностью наиболее сильно, так как максимальное давление, которое этот белок может выдержать (не будучи частично выброшенным), составляет 19,2 мН/м, в то время как для В6.4-13 этот показатель равен 16,7 мН/м [18]. Для коллоидной химии важно накопление большого массива данных о межфазных свойствах модельных и биологических БАВ, особенно в многокомпонентных системах, а также усовершенствование методов анализа и внедрение технологий в хозяйственную деятельность.

Цель данной работы – изучение параметров динамического поверхностного натяжения многокомпонентных смесей, состоящих из белков, липидов, солей, которые моделируют параметры плазмы крови животных.

Материал и методы

Метод измерения максимального давления в пузырьке воздуха, висящем в жидкости (maximal pressure in the buoyant bubble), являясь одним из методов межфазной тензиометрии, позволяет получить большой массив значений динамического поверхностного натяжения, которые визуализируются в кривые зависимости поверхностного натяжения (σ) в широком диапазоне времени [4–7].

В работе использовался наиболее компактный и удобный, по нашему мнению, прибор для измерения образцов модельных систем и биологических жидкостей – тензиометр «ВРА-1Р» («Sinterface», Германия), на котором были установлены следующие параметры ДПН: σ_1 – на очень короткий промежуток времени (0,1 с), σ_2 – на средний промежуток времени (1 с), σ_3 – на длинный промежуток времени (100 с), а также наклоны начального, центрального и конечного участков «тензиограмм» (λ_0 , λ_1 и λ_2) [4–7].

Исследованы растворы трехкомпонентных систем на основе: а) бычьего сывороточного альбумина (БСА); б) природного фосфатидилхолина (ФХ) или так называемого лецитина; в) хлорида натрия (NaCl). Все манипуляции проводились с очищенными растворами, приготовленными на бидистиллированной воде. Статистический анализ полученных данных был выполнен с помощью общих статистических программ для

Windows с критическими значениями критерия надежности на основе распределений Стьюдента (P).

Результаты и обсуждение

В предыдущей статье [5] были описаны одно- и двухкомпонентные системы на основе: а) бычьего сывороточного альбумина (БСА) как представителя белковой фракции плазмы (сыворотки) крови; б) природного фосфатидилхолина (ФХ) или так называемого лецитина; в) хлорида натрия (NaCl), а также подходы к оценке трехкомпонентных систем.

Ниже рассмотрены данные исследований трехкомпонентных систем БСА:ФХ:NaCl разного состава. Такие сложные системы являются наиболее адекватными (на данный момент) моделями плазмы (сыворотки) крови животных и человека. Одним из основных методов для изучения параметров таких сложных систем является измерение динамического поверхностного натяжения этих трехкомпонентных растворов.

Приведены основные параметры тензиограмм ДПН для растворов, в которых концентрации компонентов изменялись в следующих пределах: 20–80 г/л (БСА), 0,5–4,0 мМ (ФХ), 110–150 мМ (NaCl). Такие условия близки к диапазону концентраций общего белка, липидов и солей в плазме (или сыворотке) крови человека и большинства видов сельскохозяйственных и домашних животных [3].

В предварительных исследованиях ДПН сложных трехкомпонентных смесей БАВ установлено, что в области коротких промежутков времени (0,1–1,0 с) основное влияние оказывает содержание соли (особенно в высоких концентрациях), а в области больших промежутков времени (10–100 с) – концентрация белка [5]. Интересно, что изменения в концентрации лецитина (в пределах, обнаруживаемых в крови [3]) практически не оказывают влияния на большинство параметров ДПН (табл. 1). Исключением являются заметные колебания параметра λ_1 – сначала увеличение на 22%, а потом уменьшение на 18% относительно исходного значения ($8,2 \text{ мН} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{с}^{1/2}$) при концентрации лецитина 0,5–1,0 мМ (табл. 1).

Важно, что при изменении концентрации белка в смеси с лецитином и хлоридом натрия наблюдаются существенные изменения ряда параметров ДПН (табл. 2). Значения для наиболее информативного параметра λ_1 неуклонно снижаются – суммарно на 43% (если сравнивать с самой малой (20 г/л) концентрацией белка) или на 68% (если сравнивать с самой большой (80 г/л) концентрацией белка

Таблица 1

Динамическое поверхностное натяжение смеси БСА (60 г/л), хлорида натрия (140 мМ) и лецитина с концентрацией ($C_{л}$) от 0,5 до 4 мМ

Параметр \ $C_{л}$, мМ	0,5	1	2	3	4
σ_1 , мН/м	73,85±0,16	73,13±0,13	73,42±0,11	73,67±0,10	73,38±0,05
σ_2 , мН/м	64,72±0,13	65,29±0,15	66,12±0,12	65,51±0,07	65,14±0,05
σ_3 , мН/м	57,50±0,05	57,04±0,06	57,17±0,18	58,17±0,16	58,34±0,14
σ_4 , мН/м	52,3±0,12	51,67±0,14	51,93±0,13	50,1±0,08	51,99±0,07
λ_0 , мН·м ⁻¹ ·с ^{1/2}	10,8±0,2	7,9±0,3	10,7±0,1	11,3±0,2	10,3±0,1
λ_1 , мН·м ⁻¹ ·с ^{1/2}	8,2±0,2	8,2±0,3	9,9±0,2	7,4±0,1	6,7±0,1
λ_2 , мН·м ⁻¹ ·с ^{1/2}	27,7±0,1	27,4±0,1	25,9±0,1	27,2±0,1	27,5±0,2

Таблица 2

Динамическое поверхностное натяжение смеси лецитина (3 мМ), хлорида натрия (150 мМ) и БСА с концентрацией ($C_{БСА}$) от 20 до 80 г/л

Параметр \ $C_{БСА}$, г/л	20	30	60	80
σ_1 , мН/м	73,91±0,16	72,04±0,15	73,24±0,15	72,15±0,16
σ_2 , мН/м	67,80±0,13	66,34±0,13	65,03±0,15	64,34±0,15
σ_3 , мН/м	58,49±0,14	58,37±0,15	58,82±0,15	57,95±0,16
σ_4 , мН/м	51,45±0,12	51,36±0,13	50,62±0,14	50,17±0,11
λ_0 , мН·м ⁻¹ ·с ^{1/2}	8,8±0,1	7,1±0,2	11,5±0,1	11,3±0,1
λ_1 , мН·м ⁻¹ ·с ^{1/2}	10,8±0,2	7,9±0,1	6,2±0,2	6,4±0,1
λ_2 , мН·м ⁻¹ ·с ^{1/2}	29,3±0,1	25,1±0,2	24,3±0,1	23,5±0,3

(табл. 2). Значения для параметра λ_2 неуклонно снижаются – суммарно на 20% (если сравнивать с самой малой (20 г/л) концентрацией белка или на 25% (если сравнивать с самой большой (80 г/л) концентрацией белка (табл. 2). Значения для параметра λ_0 суммарно повышаются на 28% (если сравнивать с самой малой (20 г/л) концентрацией белка или на 22% (если сравнивать с самой большой (80 г/л) концентрацией белка (табл. 2). Как правило, наблюдается небольшое уменьшение всех параметров σ_1 – σ_4 на 3–5% при увеличении концентрации белка от 20 до 80 г/л при соотношении ФХ:NaCl = 1:50 (табл. 2).

Аналогичные изменения параметров σ_1 , σ_2 и σ_3 (на 3–5%) наблюдаются при увеличении концентрации белка от 20 до 80 г/л, тогда как значения параметра σ_4 практически не менялись в данном диапазоне изменений концентрации белка при соотношении ФХ:NaCl = 1:47 (табл. 3). Значение

параметра λ_0 было максимальным, а значения параметров λ_1 и λ_2 были минимальными при концентрации белка 60–80 г/л, что можно рассматривать как диапазон оптимальных концентраций белка в трехкомпонентной системе (табл. 3). Интересно, что изменение соотношения лецитин:NaCl в сторону еще большего уменьшения содержания соли (1:43) (табл. 4), приводящее к снижению ДПН на 5% происходит при концентрации белка от 40 г/л и выше, но уже при средних и больших диапазонах времени существования поверхности (σ_1 – σ_4). Важно, что значения всех трех параметров λ_0 , λ_1 и λ_2 были минимальными при концентрации белка 60–80 г/л. Это подтверждает отмеченную ранее закономерность (табл. 4).

Для подтверждения ранее выдвинутого тезиса [5] о том, что изменения в концентрации лецитина (0,5–4,0 мМ) практически не оказывают влияния на большинство параметров ДПН, был проведен ряд опытов с изменением в соотноше-

Т а б л и ц а 3

Динамическое поверхностное натяжение смеси лецитина (3 мМ), хлорида натрия (140 мМ) и БСА с концентрацией ($C_{\text{БСА}}$) от 20 до 80 г/л

Параметр \ $C_{\text{БСА}}$, г/л	20	30	60	80	80
σ_1 , мН/м	73,95±0,15	73,75±0,16	73,35±0,12	73,67±0,13	72,45±0,13
σ_2 , мН/м	67,33±0,14	66,33±0,14	65,74±0,15	65,51±0,16	64,95±0,12
σ_3 , мН/м	59,24±0,13	58,03±0,14	55,39±0,12	56,17±0,12	56,70±0,13
σ_4 , мН/м	50,69±0,08	51,08±0,06	51,12±0,05	50,1±0,04	50,6±0,04
λ_0 , мН·м ⁻¹ ·с ^{1/2}	10,1±0,1	10,3±0,2	10,5±0,1	11,3±0,1	9,2±0,1
λ_1 , мН·м ⁻¹ ·с ^{1/2}	8,9±0,2	9,4±0,1	13,3±0,1	7,4±0,2	8,3±0,2
λ_2 , мН·м ⁻¹ ·с ^{1/2}	32,8±0,1	32,3±0,1	31,1±0,2	22,2±0,2	24,8±0,1

Т а б л и ц а 4

Динамическое поверхностное натяжение смеси лецитина (3 мМ), хлорида натрия (130 мМ) и БСА с концентрацией ($C_{\text{БСА}}$) от 20 до 80 г/л

Параметр \ $C_{\text{БСА}}$, г/л	20	30	40	60	80
σ_1 , мН/м	73,92±0,12	73,57±0,10	71,79±0,10	71,63±0,10	71,49±0,11
σ_2 , мН/м	67,05±0,12	65,89±0,13	65,47±0,12	64,71±0,12	63,89±0,12
σ_3 , мН/м	59,71±0,12	59,23±0,15	56,79±0,14	57,07±0,15	57,96±0,14
σ_4 , мН/м	50,09±0,14	51,11±0,16	51,15±0,11	50,82±0,07	50,16±0,06
λ_0 , мН·м ⁻¹ ·с ^{-1/2}	10,1±0,1	11,6±0,2	11,5±0,1	10,6±0,2	8,9±0,1
λ_1 , мН·м ⁻¹ ·с ^{-1/2}	7,5±0,2	9,7±0,1	10,9±0,3	6,6±0,2	5,8±0,1
λ_2 , мН·м ⁻¹ ·с ^{-1/2}	29,04±0,1	26,98±0,2	26,6±0,1	22,23±0,3	25,67±0,2

нии лецитин:NaCl. Наиболее характерный пример приведен в табл. 5, где ФХ:NaCl = 1:70. Значения ДПН снижаются в области больших промежутков времени существования поверхности, начиная с концентрации 30 г/л. Причем для концентрации белка 80 г/л значения ДПН при коротких промежутках времени существования поверхности (σ_0 и σ_1) ниже на 6%, чем для других концентраций белка в смеси, а при больших промежутках (σ_3 и σ_4) этот показатель ниже на 20% (табл. 5).

Таким образом, если концентрация лецитина оказывает небольшое влияние на ДПН только при больших промежутках времени существования поверхности (σ_4), то концентрация белка в смеси существенно влияет на ДПН при средних промежутках времени существования поверхности (σ_2 и σ_3). При разных соотношениях компонентов в смесях значения ДПН изменяются по-разному при варьировании концентрации БСА, что свя-

зано с взаимным влиянием компонентов смеси друг на друга. Для большинства смесей снижение значений ДПН происходит при увеличении концентрации белка до 60 г/л, однако есть некоторые исключения. Так, например, для смеси с большим содержанием соли (лецитин:NaCl = 1:70) значение ДПН снижается только при концентрации белка, равной ~80 г/л. Это объясняется «высаливающим» действием NaCl на молекулы белка, которое замедляет их адсорбцию на поверхности раздела фаз.

При изменении концентрации соли от 110 до 150 мМ изменение ДПН в трехкомпонентных смесях происходит главным образом в области коротких промежутков времени. Так, при малых концентрациях белка (табл. 6) значения ДПН (σ_1 и σ_2) увеличивается на 4% при увеличении концентрации хлорида натрия. Оптимальные данные значений ДПН (λ_0 , λ_1 и λ_2) наблюдаются при концентрации хлорида натрия 140 мМ.

Т а б л и ц а 5

Динамическое поверхностное натяжение смеси лецитина (2 мМ), хлорида натрия (140 мМ) и БСА с концентрацией ($C_{\text{БСА}}$) от 20 до 80 г/л

Параметр \ $C_{\text{БСА}}$, г/л	20	30	40	60	80
σ_1 , мН/м	72,46±0,16	73,31±0,17	72,09±0,13	71,91±0,19	71,51±0,12
σ_2 , мН/м	66,33±0,11	66,43±0,11	65,57±0,12	66,09±0,09	66,29±0,05
σ_3 , мН/м	61,04±0,18	59,80±0,16	57,89±0,14	58,45±0,15	56,99±0,17
σ_4 , мН/м	50,42±0,15	50,97±0,12	51,92±0,11	51,93±0,1	50,15±0,14
λ_0 , мН·м ⁻¹ ·с ^{1/2}	9,1±0,1	11,6±0,2	10,7±0,3	10,7±0,1	6,6±0,1
λ_1 , мН·м ⁻¹ ·с ^{1/2}	5,5±0,2	9,9±0,3	8,3±0,2	7,6±0,2	16,4±0,2
λ_2 , мН·м ⁻¹ ·с ^{1/2}	20,1±0,1	24,6±0,2	30,8±0,3	25,9±0,1	21,8±0,2

Т а б л и ц а 6

Динамическое поверхностное натяжение смеси БСА (30 г/л), лецитина (3 мМ) и хлорида натрия с концентрацией (C_{NaCl}) от 110 до 150 мМ

Параметр \ C_{NaCl} , мМ	110	120	130	140	150
σ_1 , мН/м	72,97±0,13	73,06±0,14	74,57±0,15	74,55±0,16	74,04±0,13
σ_2 , мН/м	65,40±0,16	66,06±0,15	65,89±0,16	66,33±0,15	66,34±0,17
σ_3 , мН/м	58,99±0,18	59,66±0,18	59,23±0,15	58,03±0,16	58,37±0,14
σ_4 , мН/м	51,17±0,11	50,94±0,1	51,11±0,12	51,08±0,11	51,36±0,06
λ_0 , мН·м ⁻¹ ·с ^{1/2}	9,7±0,1	9,8±0,2	10,3±0,1	11,6±0,1	7,1±0,1
λ_1 , мН·м ⁻¹ ·с ^{1/2}	6,3±0,2	6,6±0,1	6,6±0,2	9,4±0,2	7,9±0,3
λ_2 , мН·м ⁻¹ ·с ^{1/2}	22,4±0,1	26,7±0,12	26,98±0,2	32,3±0,11	23,1±0,01

Т а б л и ц а 7

Динамическое поверхностное натяжение смеси БСА (40 г/л), лецитина (3 мМ) и хлорида натрия с концентрацией (C_{NaCl}) от 110 до 150 мМ

Параметр \ C_{NaCl} , мМ	110	120	130	140	150
σ_1 , мН/м	73,94±0,15	73,81±0,16	72,79±0,17	73,35±0,15	73,62±0,18
σ_2 , мН/м	64,81±0,18	64,93±0,18	65,47±0,14	65,74±0,11	66,94±0,12
σ_3 , мН/м	58,12±0,14	58,28±0,17	56,79±0,18	55,39±0,16	57,60±0,12
σ_4 , мН/м	51,46±0,06	51,31±0,04	51,15±0,08	51,12±0,15	50,61±0,14
λ_0 , мН·м ⁻¹ ·с ^{1/2}	12,1±0,1	11,4±0,1	10,5±0,1	8,9±0,2	12,3±0,2
λ_1 , мН·м ⁻¹ ·с ^{1/2}	6,8±0,2	7,4±0,3	10,9±0,1	13,3±0,2	10,7±0,2
λ_2 , мН·м ⁻¹ ·с ^{1/2}	21,5±0,1	20,7±0,2	26,6±0,1	31,1±0,2	26,8±0,1

Еще менее заметные отличия в значениях ДПН (σ_1 и σ_2) при увеличении концентрации хлорида натрия, в этом случае они составляют

3%. Оптимальные данные значений ДПН (λ_0 , λ_1 и λ_2) наблюдаются при концентрации хлорида натрия 140 мМ (табл. 7). Необходимо отметить,

Т а б л и ц а 8

Динамическое поверхностное натяжение смеси БСА (60 г/л), лецитина (3 мМ) и хлорида натрия с концентрацией (C_{NaCl}) от 110 до 150 мМ

C_{NaCl} , мМ \n Параметр	110	120	130	140	150
σ_1 , мН/м	70,93±0,18	73,33±0,15	71,63±0,16	73,15±0,18	72,98±0,19
σ_2 , мН/м	64,83±0,17	64,71±0,15	64,71±0,16	64,47±0,15	65,12±0,18
σ_3 , мН/м	56,97±0,15	56,23±0,15	57,07±0,17	54,90±0,16	57,66±0,15
σ_4 , мН/м	50,79±0,14	50,46±0,11	50,82±0,08	50,1±0,07	50,64±0,08
λ_0 , мН·м ⁻¹ с ^{1/2}	9,7±0,1	11,1±0,2	10,6±0,1	7,9±0,1	10,8±0,1
λ_1 , мН·м ⁻¹ с ^{1/2}	7,8±0,2	8,2±0,1	9,7±0,1	19,0±0,1	8,3±0,1
λ_2 , мН·м ⁻¹ с ^{1/2}	19,7±0,1	16,7±0,2	22,2±0,1	22,2±0,1	24,5±0,1

Т а б л и ц а 9

Динамическое поверхностное натяжение смеси БСА (80 г/л), лецитина (3 мМ) и хлорида натрия с концентрацией (C_{NaCl}) от 110 до 150 мМ

C_{NaCl} , мМ \n Параметр	110	120	130	140	150
σ_1 , мН/м	73,32±0,12	71,61±0,15	72,06±0,13	71,51±0,17	72,18±0,1
σ_2 , мН/м	64,27±0,21	63,65±0,14	63,93±0,13	63,29±0,15	64,89±0,12
σ_3 , мН/м	56,77±0,15	57,23±0,14	58,18±0,14	49,8±0,16	56,24±0,1
σ_4 , мН/м	49,96±0,08	50,35±0,12	50,32±0,11	50,15±0,18	49,9±0,12
λ_0 , мН·м ⁻¹ с ^{1/2}	16,1±0,06	11,3±0,07	11,2±0,09	6,6±0,08	11,3±0,13
λ_1 , мН·м ⁻¹ с ^{1/2}	8,1±0,2	6,5±0,1	5,7±0,2	16,4±0,1	8,5±0,1
λ_2 , мН·м ⁻¹ с ^{1/2}	23,8±0,1	14,9±0,2	19,8±0,1	21,8±0,2	30,3±0,2

что изменение концентрации белка, так же как изменение концентрации лецитина, практически не оказывает влияния на значения ДПН при больших промежутках времени существования поверхности (σ_4) (табл. 8).

При больших концентрациях белка (табл. 9) значения ДПН (σ_1 – σ_4) практически не изменяются при увеличении концентрации хлорида натрия. Оптимальные данные значений ДПН (λ_0 и λ_1) наблюдаются при концентрации хлорида натрия 140 мМ (табл. 9)

Таким образом, концентрация соли оказывает небольшое влияние на значения ДПН смесей и только при малых промежутках времени суще-

ствования поверхности. При разных соотношениях компонентов в смеси с увеличением концентрации соли происходит повышение значений ДПН при малых и средних промежутках времени и их снижение при больших промежутках времени. Полученные закономерности важны как для дополнения фундаментальных баз данных, так и для прогностического моделирования в биологии и медицине.

Автор благодарит сотрудников кафедры химии ФГБОУ ВО МГАВМиБ – МВА имени К.И. Скрябина И.В. Милаеву, Е.Н. Зарудную, Н.А. Довженко и М.С. Царькову за оказание технической помощи и ценные замечания.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда
(грант 14-16-00046).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Холмберг К., Йёнссон Б., Кронберг Б., Линдман Б. Поверхностно-активные вещества и полимеры в водных растворах. М., 2007. С. 528.
2. Зайцев С.Ю. Супрамолекулярные наноразмерные системы на границе раздела фаз: концепции и перспективы для бионанотехнологий. М., 2010. С. 208.
3. Vogler E.A. // *Biomaterials*. 2012. Vol. 33. N 5. P. 1201.
4. Kazakov V.N., Sinyachenko O.V., Fainerman V.B., Pison U., Miller R. In *Studies in Interface Science* Amsterdam, 2000. P. 34.
5. Зайцев С.Ю. // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 2. Химия. 2016. Т. 57. № 3. С. 198.
6. Zaitsev S.Yu., Milaeva I.V., Zarudnaya E.N., Maximov V.I. // *Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects*. 2011. Vol. 383. P. 109.
7. Fainerman V.B., Zholob M., Leser K. // *J. of Colloid and Interface Science*. 2004. Vol. 274. P. 496.
8. Zaitsev S. Yu. // Dynamic surface tension measurements as general approach to the analysis of animal blood plasma and serum. *Advances in Colloid and Interface Science*. 2016. Vol. 235. P. 201.
9. Turro N.J., Lei X-G., Ananthapadmanabhan K.R., Aronson M. // *Langmuir*. 1995. Vol. 11. N 7. P. 2525.
10. Vasilescu M., Angelescu D., Almgren M., Valstar A. // *Langmuir*. 1999. Vol. 15. N 8. P. 2635.
11. Santos S.F., Zanette D., Fischer H., Itri R. // *J. Colloid and Interface Sci*. 2003. Vol. 262. N 2. P. 400.
12. Absolom D.R., Van Oss C.J., Zingg W., Neumann A.W. // *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) – Protein Structure* 1981. Vol. 670. P. 74.
13. Miller R., Policova Z., Sedev R. // *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 1993. Vol. 76. P. 179.
14. Suttisprasi P., Krisdhasima V., McGuire // *J. Colloid Interface Sci*. 1992. Vol. 154. P. 316.
15. Paulsson M., Dejmeck P. // *Colloid Interface Sci*. 1992. Vol. 150. P. 394.
16. Serrien G., Geeraerts G., Ghosh L. // *Colloids and Surfaces*. 1992. Vol. 68. P. 219.
17. Wang L., Jiang Z.G., McKnight C.J., Small D.M. // *Biochemistry*. 2010. Vol. 49. N 18. P. 3898.
18. Meyers N.L., Wang L., Small D.M. // *J Lipid Res*. 2014. Vol. 55. N 3. P. 478.

Поступила в редакцию 12.09.16

DYNAMIC SURFACE TENSION PARAMETERS OF THE PROTEIN–LIPID–SOLT SOLUTIONS AS A SYSTEM MODELING OF BLOOD PLASMA

S.Yu. Zaitsev

(Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Moscow state Academy of Veterinary Medicine and Biotechnology – MVA by K.I. Skryabin; e-mail: szaitsev@mail.ru)

Measurements of the dynamic surface tension (DST) of liquids is one of the simplest and fastest methods for the analysis of various chemical solutions and biological liquids. Solutions of the ternary systems based on bovine serum albumin (BSA), natural phosphatidylcholine (PC) and sodium chloride were investigated. It is found that at short times (0.1–1.0 s) the major impact had salt content (especially at high concentrations), but in the medium and long times (over 1.0 second) – BSA concentration, whereas the changes in the PC concentration (in the range usual for blood) had little impact on most of the DST parameters. The most informative (Among the seven studied DST parameters) was the changes (at 22–68%) of tilt tensiogram values λ_0 , λ_1 and λ_2 . This allowed the determination of the optimal concentrations ranges: BSA (60–80 g/l), PC (1–4 mM), NaCl (130–150 mM) in the mixture, which corresponded to their content in blood plasma of humans and animals. For four parameters σ_1 ... σ_4 found only small correlations with the changes in the ratio of three components in the mixture. The resulting patterns are important for complement basic database and for predictive modeling in biology and medicine.

Key words: solutions, bovine serum albumin, phosphatidylcholine, dynamic surface tension, blood plasma.

Сведения об авторах: Зайцев Сергей Юрьевич – зав. кафедрой химии, ФГБОУ ВО МГАВМиБ – МВА им. К.И. Скрябина, докт. биол. наук, докт. хим. наук, профессор (szaitsev@mail.ru).