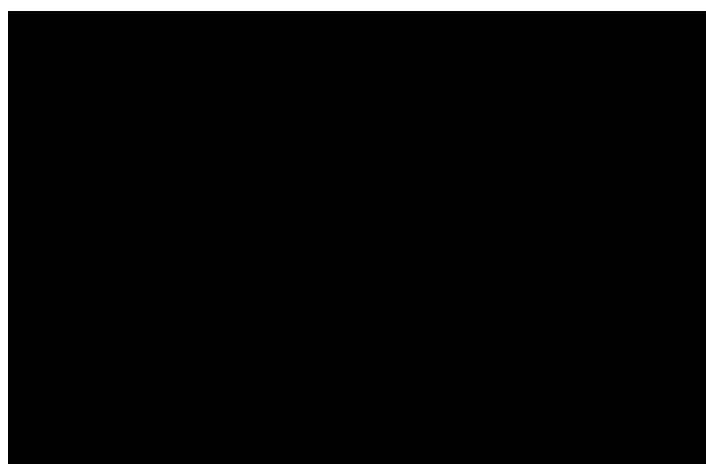


А.Б. КИЛИМНИК, В.В. ЯРМОЛЕНКО

**МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ
И РАСЧЁТА РЕАКТИВНЫХ
СОСТАВЛЯЮЩИХ ИМПЕДАНСА
И СРЕДНИХ РЕЗОНАНСНЫХ ЧАСТОТ
КОЛЕБАНИЙ
ГИДРАТИРОВАННЫХ ИОНОВ**



ИЗДАТЕЛЬСТВО ТГТУ

Министерство образования и науки Российской Федерации
ГОУ ВПО «Тамбовский государственный технический университет»

А.Б. КИЛИМНИК, В.В. ЯРМОЛЕНКО

**МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ
И РАСЧЁТА РЕАКТИВНЫХ
СОСТАВЛЯЮЩИХ ИМПЕДАНСА
И СРЕДНИХ РЕЗОНАНСНЫХ ЧАСТОТ КОЛЕБАНИЙ
ГИДРАТИРОВАННЫХ ИОНОВ**

Рекомендовано Научно-техническим советом университета
в качестве монографии



Тамбов
◆ Издательство ТГТУ ◆
2008

УДК 541.13(075.8)
ББК Г 5/6
К392

Рецензенты:

Доктор технических наук, профессор
С.И. Дворецкий

Кандидат химических наук, доцент
Б.И. Исаева

Килимник, А.Б.

К392 Методы определения и расчёта реактивных составляющих импеданса и средних резонансных частот колебаний гидратированных ионов: монография / А.Б. Килимник, В.В. Ярмоленко. – Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2008. – 116 с. – 100 экз. – ISBN 978-5-8265-0726-1.

Монография посвящена вопросам создания научных основ процессов, протекающих в двойном электрическом слое при наложении переменного тока. Особое внимание уделено описанию методов определения реактивных составляющих импеданса и программно-аналитического комплекса для расчёта средних резонансных частот колебаний гидратированных ионов в растворах с различной концентрацией при заданной температуре.

Монография предназначена для студентов, аспирантов и научных работников, специализирующихся в области физической химии, теоретической и прикладной электрохимии, а также для преподавателей учебных курсов: «Физическая химия», «Электрохимия» и «Физико-химические методы аналитического контроля».

УДК 541.13(075.8)

ББК Г 5/6

ISBN 978-5-8265-0726-1 © Килимник А.Б., Ярмоленко В.В., 2008
© ГОУ ВПО «Тамбовский государственный
технический университет» (ГГТУ), 2008

Научное издание

КИЛИМНИК Александр Борисович
ЯРМОЛЕНКО Владислав Владимирович

МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ И РАСЧЁТА РЕАКТИВНЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ ИМПЕДАНСА И СРЕДНИХ РЕЗОНАНСНЫХ ЧАСТОТ КОЛЕБАНИЙ ГИДРАТИРОВАННЫХ ИОНОВ

Монография

Редактор З.Г. Чернова
Инженер по компьютерному макетированию М.А. Филатова

Подписано в печать 05.05.2008.
Формат 60 × 84/16. 6,74 усл. печ. л. Тираж 100 экз. Заказ № 227.

Издательско-полиграфический центр
Тамбовского государственного технического университета,
392000, Тамбов, Советская, 106, к. 14

Переменный электрический ток различной формы и частоты широко используется для изучения свойств растворов электролитов, механизмов электродных процессов, определения концентрации растворов электролитов [1].

При объяснении результатов измерения электропроводности растворов электролитов различными методами и электрохимического синтеза веществ на переменном токе необходимо учитывать возможность возникновения резонансных колебаний гидратированных ионов [2].

Данная монография посвящена рассмотрению колебательных процессов в двойном электрическом слое при наложении переменного электрического тока; метода отдельного определения реактивных составляющих импеданса и расчёта средних резонансных частот колебаний гидратированных ионов; влияния концентрации и температуры растворов электролитов на реактивные составляющие электродного импеданса и средние резонансные частоты колебаний гидратированных ионов. Рассмотрено влияние площади поверхности электродов на точность определения реактивных составляющих импеданса и обоснован выбор конструкции кондуктометрической ячейки. Изложены методики подготовки кондуктометрической ячейки к измерениям и расчёта составляющих импеданса. Приведён разработанный авторами программно-аналитический комплекс для расчёта средних резонансных частот колебаний гидратированных ионов.

В монографии представлены впервые полученные данные измерения и расчёта реактивных составляющих импеданса кондуктометрической ячейки с растворами хлоридов натрия и калия. Приведены установленные зависимости реактивных составляющих импеданса от температуры и концентрации растворов и показано, что характер найденных зависимостей определяется средними ионными коэффициентами активности растворов электролитов, обобщёнными потенциалами ионов, предельной эквивалентной электропроводностью ионов и кинематической вязкостью растворов.

Полученные нами уравнения были использованы при разработке программно-аналитического комплекса для расчёта средних резонансных частот колебаний гидратированных ионов.

Программно-аналитический комплекс построен в среде программирования Visual C++ . Он состоит из двух программ.

С помощью первой программы рассчитывают среднюю резонансную частоту колебаний гидратированных ионов водных растворов хлоридов калия и натрия с концентрациями $0,1 \dots 4 \text{ м}$ (шаг $0,1 \text{ м}$) в интервале температур $25 \dots 40 \text{ }^\circ\text{C}$ (шаг $1 \dots 5 \text{ }^\circ\text{C}$).

Первая программа позволяет производить оперативные расчеты средних резонансных частот колебаний гидратированных ионов хлоридов калия и натрия с шагом концентрации только $0,1 \text{ м}$. Для практических целей необходимо рассчитывать значения средних резонансных частот колебаний гидратированных ионов с меньшим шагом концентрации.

С целью решения этой задачи нами использована первая программа для расчета средних резонансных частот колебаний гидратированных ионов в широком диапазоне концентраций и температур ($25 \dots 40 \text{ }^\circ\text{C}$) и для построения графиков зависимостей средних резонансных частот колебаний от концентрации при различных температурах (шаг $1 \text{ }^\circ\text{C}$).

Полученные с помощью программы Microsoft Excel аппроксимационные уравнения линий тренда применены в программно-аналитическом комплексе для расчета средних резонансных частот колебаний гидратированных ионов в интервале концентраций $0,1 \dots 4 \text{ м}$ с шагом $0,01 \text{ м}$ (вторая программа).

Вторая программа отличается от первой тем, что она позволяет рассчитывать средние резонансные частоты колебаний гидратированных ионов при концентрациях недоступных для первой программы.

С помощью второй программы возможно рассчитать резонансную частоту колебаний гидратированных ионов при различных концентрациях растворов хлоридов калия и натрия в интервале $0,1 \dots 4,0 \text{ м}$ с шагом $0,01 \text{ м}$ при заданной температуре от $25 \dots 40 \text{ }^\circ\text{C}$ с шагом $1 \text{ }^\circ\text{C}$.

Работа выполнена в соответствии с аналитической ведомственной целевой программой «Развитие научного потенциала высшей школы на 2006 – 2008» (тема РНП 2.1.1.1635 «Научные основы экологически чистых электрохимических процессов синтеза органических соединений на переменном и постоянном токе»).

Монография предназначена для студентов, аспирантов и научных работников, специализирующихся в области разработки электрохимических методов исследования свойств веществ, а также для преподавателей учебных курсов «Физическая химия», «Электрохимия» и «Физико-химические методы аналитического контроля».

1. КОЛЕБАТЕЛЬНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ДВОЙНОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ СЛОЕ ПРИ НАЛОЖЕНИИ ПЕРЕМЕННОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА

Согласно представлениям о том, что ион в переменном электрическом поле двойного электрического слоя испытывает воздействие способное заставить его колебаться [2], нами предложено использовать одну из возможных схем перемещения гидратированных ионов (рис. 1.1) для разработки физической и математической моделей рассматриваемого процесса.

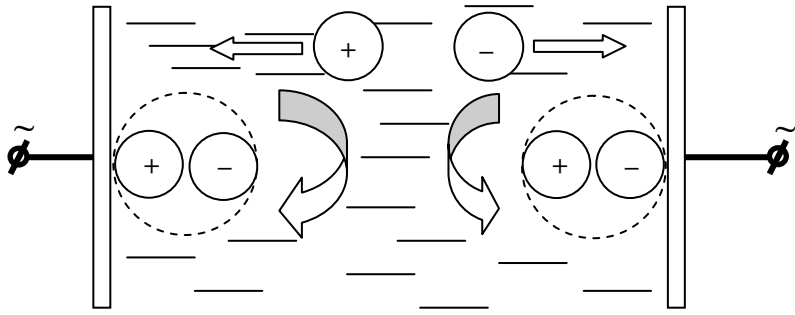


Рис. 1.1. Схема перемещения ионов в двойном электрическом слое и в растворе 1,1-валентного электролита

Показанной на рис. 1.1 схеме перемещения гидратированных ионов соответствует эквивалентная электрическая схема (рис. 1.2). Правомерность использования этой схемы замещения кондуктометрической ячейки была доказана нами экспериментально.

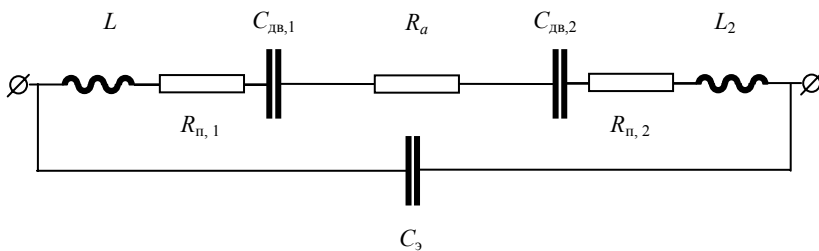


Рис. 1.2. Эквивалентная электрическая схема кондуктометрической ячейки

При совпадении частоты налагаемого на электроды переменного тока с собственной частотой колебаний ионов наступает резонанс. Так как ионы имеют различную массу, то им должны соответствовать индивидуальные резонансные частоты колебаний в двойном электрическом слое. Наличие этого явления было подтверждено в работе [3] на примере процессов разряда-ионизации ионов различных металлов. Авторы рассматриваемой работы исходили из представлений о растворах электролитов как о плазме, в которой происходят колебания с ленгмювской частотой:

$$\omega = [(4\pi n_i z^2 e^2) / (M_i)]^{0,5}, \quad (1.1)$$

где n_i – плотность ионов; z – заряд иона; M_i – масса заряженной частицы; e – заряд электрона.

Они вывели формулу (1.2) для расчёта резонансных частот ионов в процессе разряда-ионизации, удовлетворительно описывающую экспериментальные результаты, полученные при электроосаждении ионов металлов с использованием асимметричного переменного тока:

$$f = K / (n A), \quad (1.2)$$

где f – частота асимметричного переменного тока, Гц; K – предельная частота разряда-ионизации (95519 Гц); n – валентность осаждаемого металла; A – атомная масса осаждаемого металла, г/моль.

Нам представляется, что этот подход можно использовать при определении резонансных частот вынужденных колебаний ионов растворов электролитов, образующих ионные обкладки двойного электрического слоя, когда не осуществляются процессы разряда-ионизации. Как известно, в двойном электрическом слое наблюдается резкое уменьшение диэлектрической проницаемости воды от 81 до 2...3. Это явление обуславливает увеличение сил взаимного притяжения противоположно заряженных ионов в двойном электрическом слое по сравнению с силами, действующими между ионами, находящимися в отдалении от него.

Колебательный процесс в двойном электрическом слое возбуждается внешним источником переменного тока. При этом ионы испытывают то тормозящее, то ускоряющее их движение действие электрического поля электродов, перезаряжаемых в такт с частотой переменного тока. Такая физическая картина позволяет уподобить кондуктометрическую ячейку двум колебательным контурам, соединённым между собой раствором электролита. Причём эти «колебательные контуры» имеют «конденсатор» – двойной электрический слой и «индуктивность», появление которой связано с инерционными свойствами движения ионов, обеспечивающих протекание переменного электрического тока, аналогично электронам в проводниках электрического тока первого рода.

Рассмотрим некоторые физико-химические свойства растворов электролитов.

Растворы электролитов, как известно, представляют собой проводники электрического тока второго рода. Носители тока – катионы и анионы в растворах окружены ионной атмосферой и при своём движении под действием электрического поля тормозят взаимное перемещение. Возникают так называемые электрофоретические и релаксационные эффекты, приводящие к кажущемуся понижению концентрации растворов электролитов. Учитывают эти эффекты путём замены концентрации растворов на произведение среднего ионного коэффициента активности (γ_{\pm}) и концентрации (m) [4].

При движении ионов в электрическом поле через условно выбранную границу часть тока переносится анионами, а часть – катионами. Учёт этого явления в расчётах осуществляется с помощью чисел переноса (t_a и t_k).

При образовании водных растворов электролитов происходит гидратация ионов. Число молекул воды первой и второй гидратных сфер, увлекаемых ионами при своём движении, необходимо рассчитывать с использованием значений обобщённых потенциалов (V_i) ионов [5]. Масса колеблющейся системы гидратированных ионов может рассматриваться как среднегеометрическая величина (по аналогии с взаимной индуктивностью цилиндрических катушек индуктивности, расположенных коаксиально).

На скорость движения гидратированных ионов оказывает влияние и вязкость раствора электролита, увеличение которой должно понижать резонансную частоту колебаний системы. Кроме того, значение резонансной частоты рассматриваемых взаимосвязанных колебаний может определяться соотношением подвижностей анионов и катионов.

Растворы электролитов по своим свойствам находятся между плазмой и проводниками электрического тока первого рода. Действительно, плазма – это разреженный ионизированный газ. Электрический ток в нём переносится электронами и ионами. Водный раствор электролита представляет собой систему взаимодействующих гидратированных ионов и молекул воды – электрический ток в растворах электролитов переносится ионами. В металлах электрический ток переносится валентными электронами (электронный газ), а анионы металла находятся в узлах кристаллической решётки.

Преобразуем формулу (1.1) для случая движения гидратированных ионов в растворах сильных электролитов, считая, что в такт с изменением амплитуды налагаемого переменного тока происходит взаимосвязанное перемещение гидратированных катионов и анионов обкладки двойного электрического слоя. Плотность зарядов заменим на активность раствора электролита $\gamma_{\pm} m = (t_a \gamma_{\pm} m_- + t_k \gamma_{\pm} m_+)$, так как $t_a + t_k = 1$; заряд электрона – на постоянную Фарадея F ; корень квадратный из массы заряженной частицы – на среднегеометрическую молекулярную массу системы гидратированных анионов и катионов $(M_a \cdot M_k)^{0,5}$; полученный результат разделим на относительную вязкость раствора электролита $\varphi^{(v_+ + v_-)}$.

Ранее в уравнение для расчёта резонансной частоты был введен множитель $k = 1/(\tau F \varphi^{(v_+ + v_-)})$, который учитывал время перезарядки двойного электрического слоя (τ), число Фарадея (F) и относительную вязкость раствора электролита (φ). Введение такого множителя приводило к исчезновению из формулы заряда гидратированных ионов, что, по-видимому, неправомерно. В работе [2] эта неточность была устранена. С учётом этих замен была получена формула (1.3) для расчёта круговой резонансной частоты колебаний гидратированных ионов в растворах сильных электролитов:

$$\omega_{\pm} = (\varphi^{(v_+ + v_-)})^{-1} k [4\pi F^2 \gamma_{\pm} m \Lambda_{\pm} / (M_a M_k \Lambda_{\pm})]^{0,5}, \quad (1.3)$$

где k – коэффициент, равный $3,8 \cdot 10^{-2} \text{ Кл}^{-1} \cdot \text{моль}^{-0,5} \cdot \text{кг}^{1,5} \cdot \text{с}^{-1}$; φ – относительная вязкость раствора электролита; v_-, v_+ – числа анионов и катионов в молекуле электролита; F – постоянная Фарадея, Кл · моль⁻¹;

γ_{\pm} – средний ионный коэффициент активности раствора; m – моляльная концентрация раствора электролита, моль · кг⁻¹; Λ_{\pm} , Λ_{\pm} – предельные подвижности анионов и катионов, Ом⁻¹ · м² · кмоль⁻¹; M_a, M_k – массы гидратированных анионов и катионов, кг · моль⁻¹.

В переменном электрическом поле на перемещающийся ион должны влиять не только ближайшие дипольные молекулы растворителя, число которых соответствует координационному числу, но и более удалённые. Их число можно определить, используя значения обобщённых потенциалов ионов растворённого электролита (V_i). Количество молекул воды, влияющих на поведение гидратированных ионов в переменном электрическом поле, будет также определяться и активностью раствора электролита. Учёт этих явлений приводит к формуле для расчёта массы колеблющегося гидратированного иона [2]:

$$M_i = A_i + M_{\text{H}_2\text{O}} [V_i / (M_{\text{H}_2\text{O}} \gamma_{\pm} m \Sigma V_i)]^{0,5}, \quad (1.4)$$

где A_i – атомная масса катиона (аниона), кг · моль⁻¹; V_i – обобщённый потенциал катиона (аниона), В; γ_{\pm} – средний ионный коэффициент активности раствора электролита; m – концентрация раствора электролита, моль/кг; $M_{\text{H}_2\text{O}}$ – молекулярная масса воды, кг · моль⁻¹.

Так как $\omega_{\pm} = 2\pi f_{r,\pm}$, выражение для расчёта средней резонансной частоты колебаний гидратированных ионов принимает вид:

$$f_{r,\pm} = (\varphi^{(v_+ + v_-)})^{-1} k [F^2 \gamma_{\pm} m \Lambda_{\pm} / (\pi M_a M_k \Lambda_{\pm})]^{0,5}. \quad (1.5)$$

Используя имеющиеся в литературе [5 – 7] значения средних коэффициентов активности, вязкости и обобщённых потенциалов, мы рассчитали резонансные частоты взаимосвязанных колебаний некоторых гидратированных ионов в двойном электрическом слое.

Результаты выполненных с использованием формулы (1.5) расчётов средних резонансных частот взаимосвязанных колебаний гидратированных ионов (хлора и калия; хлора и натрия) в двойном электрическом слое приведены в табл. 1.1.

1.1. Средние резонансные частоты колебаний

гидратированных ионов в двойном электрическом слое

(растворы KCl и NaCl; $T = 298 \text{ K}$)

Вещество	KCl	NaCl	Вещество	KCl	NaCl
m , моль/кг	$f_{r,\pm}$, расч., Гц	$f_{r,\pm}$, расч., Гц	m , моль/кг	$f_{r,\pm}$, расч., Гц	$f_{r,\pm}$, расч., Гц
0,1	1507	1265	0,8	8538	7032

0,2	2725	2328	0,9	9748	7652
0,3	3844	3279	1,0	10199	8238
0,4	4870	4140	2,0	–	12636
0,5	5840	4938	3,0	–	14500
0,6	6777	5683	4,0	–	15247
0,7	7665	6381	5,0	–	15071

Зависимости средних резонансных частот колебаний гидратированных ионов хлоридов калия и натрия от концентрации имеют одинаковый вид и описываются соответственно уравнениями (1.6) и (1.7), которые отличаются только величинами численных значений коэффициентов:

$$f_{r,\pm} = 2730,6 m^3 - 6779,4 m^2 + 14332 m + 66,392; \quad (1.6)$$

$$f_{r,\pm} = 2405,2 m^3 - 6875,3 m^2 + 12698 m + 26,699. \quad (1.7)$$

С увеличением концентрации растворов хлоридов калия и натрия значения средних резонансных частот колебаний гидратированных ионов растут (рис. 1.3).

Это явление может быть объяснено уменьшением массы колеблющихся гидратированных ионов, обусловленным значительным убыванием количества увлекаемых ими молекул воды и снижением величины среднего ионного коэффициента активности при изменении концентрации растворов хлорида калия или натрия от 0 до 1 m .

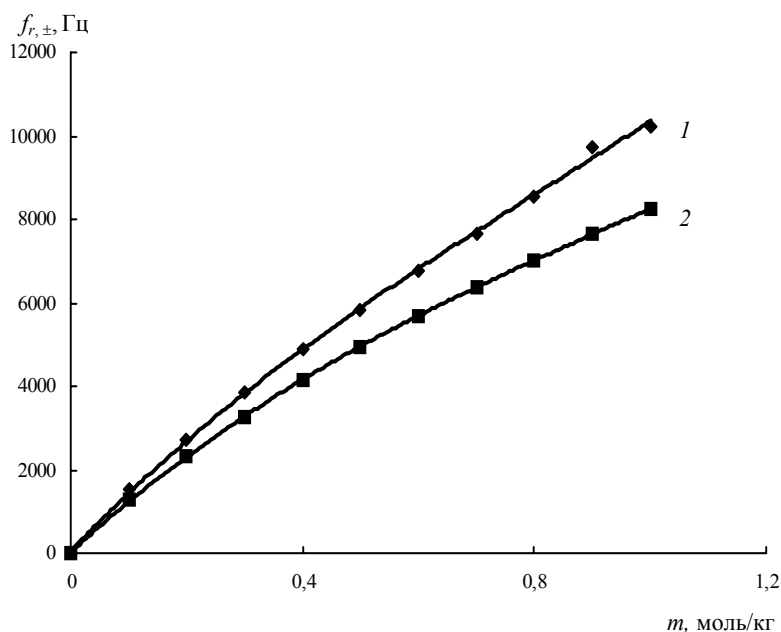


Рис. 1.3. Зависимость средних резонансных частот колебаний гидратированных ионов хлоридов калия (1) и натрия (2) от концентрации растворов в диапазоне 0...1 m при температуре 298 К

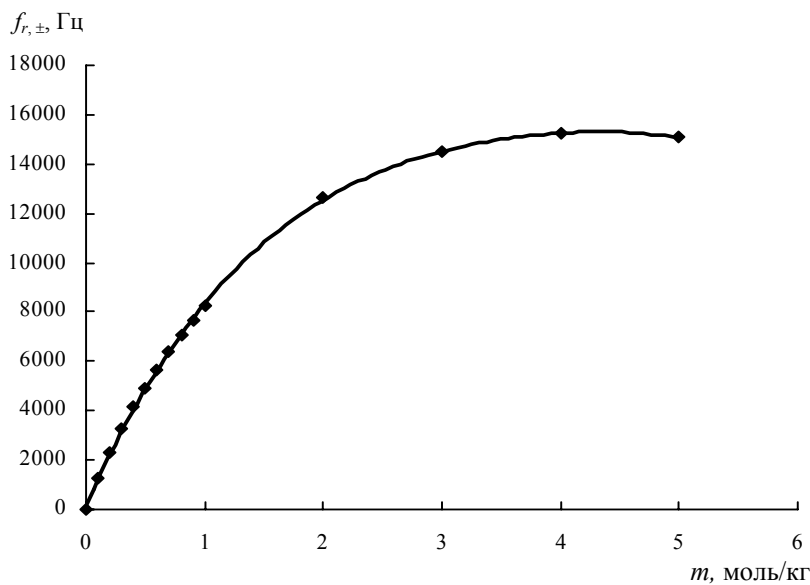
При высоких концентрациях растворов хлорида натрия увеличение средней резонансной частоты колебаний гидратированных ионов замедляется (рис. 1.4). Величина средней резонансной частоты колебаний гидратированных ионов достигает максимального значения — 15247 Гц при концентрации 4 m и затем убывает.

Уменьшение резонансной частоты колебаний для растворов хлорида натрия с концентрацией выше 4 m связано, по-видимому, с изменением характера взаимодействия между ионами хлора и натрия.

Полиномиальное уравнение в этом случае имеет вид:

$$f_{r,\pm} = -30,103 m^4 + 468,73 m^3 - 3175,2 m^2 + 10898 m + 177,44. \quad (1.8)$$

Влияние температуры на составляющие импеданса и резонансные частоты колебаний гидратированных ионов может быть связано с зависимостью входящих в формулы (1.3) – (1.5) величин средних коэффициентов активности, предельных подвижностей анионов и катионов и относительной вязкости растворов от температуры.



$$f_{r,\pm} = 34,78 T - 8888.$$

Величина достоверности аппроксимации равна 0,963.

Обращает на себя внимание различный характер экспериментальной и расчётных зависимостей резонансной частоты от температуры. По опытным данным – это возрастающая функция, а по расчётным значениям – убывающая. Причём наблюдается значительное расхождение величин углового коэффициента рассматриваемых зависимостей (на 38,5137 Гц/К).

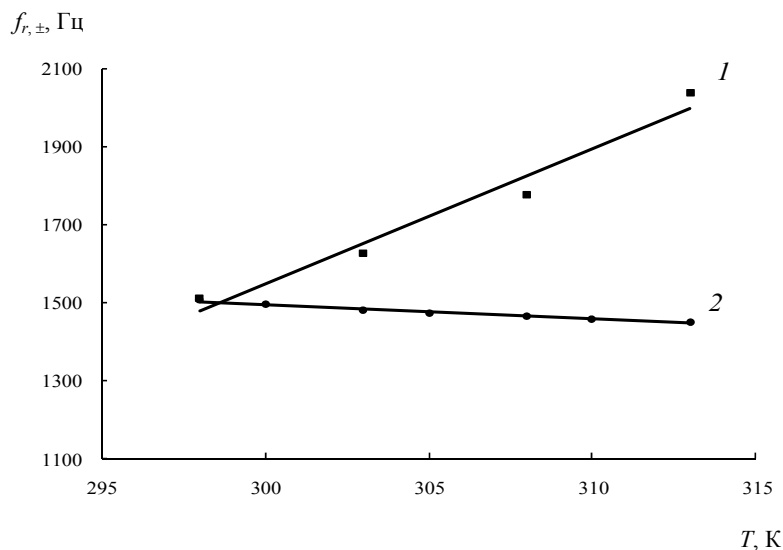


Рис. 1.5. Зависимость средних резонансных частот колебаний гидратированных ионов от температуры в 0,1 м КСl: 1 – по экспериментальным данным; 2 – по уравнению 1.5

Отметим, что расчёты по уравнению (1.5) дают хорошо соответствующие экспериментальным данным результаты лишь при 298 К.

Анализ справочных данных показывает, что из всех физических величин наиболее сильно зависят от температуры при заданной концентрации раствора динамическая и кинематическая вязкости раствора электролита.

Если в формуле (1.5) относительную вязкость заменить динамической или кинематической вязкостью, то уравнения для расчёта средней резонансной частоты колебаний гидратированных ионов принимают вид (1.9) и (1.10), соответственно:

$$f_{r,\pm} = \eta^{-1} k [F^2 \gamma_{\pm} m \Lambda_{\pm,+} / (\pi M_a M_k \Lambda_{\pm,-})]^{0,5}, \quad (1.9)$$

где η , мПа · с; $k = 0,0316228$, мПа · Кл⁻¹ · моль^{-0,5} · кг^{1,5};

$$f_{r,\pm} = \mu^{-1} k [F^2 \gamma_{\pm} m \Lambda_{\pm,+} / (\pi M_a M_k \Lambda_{\pm,-})]^{0,5}, \quad (1.10)$$

где μ , м²/с; $k = 3,16228 \cdot 10^4$, с⁻² · Кл⁻¹ · моль^{-0,5} · кг^{1,5} · м².

В качестве примера в табл. 1.2 приведены значения средних резонансных частот колебаний гидратированных ионов хлорида калия в растворах с концентрацией 0,1...0,6 моль/кг, рассчитанные по уравнениям (1.9) и (1.10) при двух температурах.

1.2. Расчётные значения средних резонансных частот колебаний гидратированных ионов в растворах КСl

T, К	m, моль/кг					
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
298	<u>1435</u>	<u>2578</u>	<u>3603</u>	<u>4552</u>	<u>5432</u>	<u>6290</u>
	1438	2595	3645	4627	5538	6439
313	<u>2176</u>	<u>3881</u>	<u>5339</u>	<u>6734</u>	<u>7916</u>	<u>9119</u>
	2169	3885	5374	6815	8026	9281

Примечание. Верхнее значение – расчёт по уравнению (1.9); нижнее значение – расчёт по уравнению (1.10).

Сравнение полученных значений средних резонансных частот колебаний гидратированных ионов для растворов хлорида калия, рассчитанных по уравнениям (1.9) и (1.10) показывает, что расхождение расчётных величин не превышает 149 Гц (0,6 m раствор KCl при 298 К). Относительные величины отклонения этих значений друг от друга приведены в табл. 1.3.

1.3. Относительные величины отклонения расчётных значений средних резонансных частот колебаний гидратированных ионов в растворах KCl

Относительное отклонение, %	m , моль/кг					
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
ε_{298}	0,21	-0,66	-1,16	-1,65	-1,95	-2,37
ε_{313}	0,32	-0,10	-0,66	-1,20	-1,39	-1,78

Согласно данным табл. 1.3, относительное отклонение величин средних резонансных частот колебаний гидратированных ионов монотонно возрастает по модулю с увеличением концентрации раствора хлорида калия. На рис. 1.6 показан вид этих зависимостей при двух значениях температуры.

При температуре 298 К зависимость ε от концентрации линейна ($r^2 = 0,9948$):

$$\varepsilon_{298} = 0,1827 - 4,3314m.$$

Увеличение температуры до 313 К приводит к смещению прямой 2 на 0,5066 % при практически неизменном значении углового коэффициента (разница составляет 0,0714 % · кг/моль).

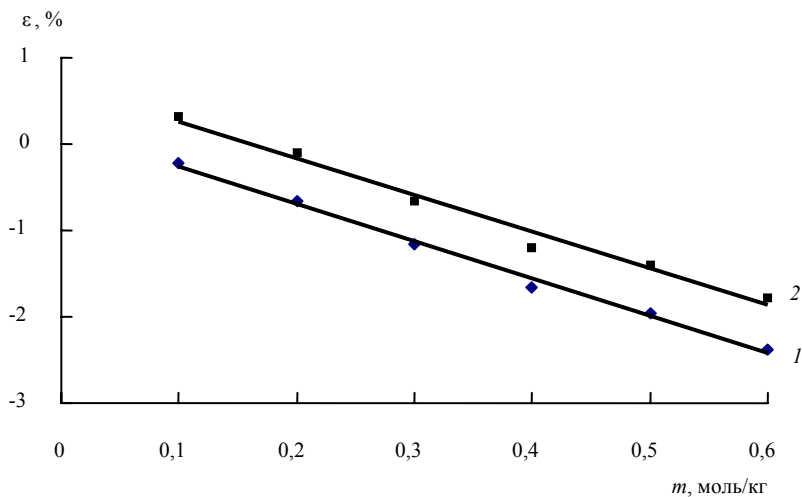


Рис. 1.6. Зависимость относительного отклонения величин средних резонансных частот колебаний гидратированных ионов, рассчитанных по уравнениям (1.9) и (1.10), от концентрации при 298 К (1) и 313 К (2)

Уравнение зависимости относительного отклонения от концентрации ($r^2 = 0,9825$) имеет вид:

$$\varepsilon_{313} = 0,6893 - 4,26m.$$

Таким образом, для выбора аналитического уравнения, отвечающего физической модели процесса, необходима экспериментальная проверка влияния температуры и концентрации

растворов электролита на реактивные составляющие импеданса и средние резонансные частоты колебаний ионов в двойном электрическом слое.

2. МЕТОД РАЗДЕЛЬНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ РЕАКТИВНЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ ИМПЕДАНСА И РАСЧЕТА СРЕДНИХ РЕЗОНАНСНЫХ ЧАСТОТ КОЛЕБАНИЙ ГИДРАТИРОВАННЫХ ИОНОВ

Метод нахождения реактивной составляющей импеданса основан на измерении ёмкости кондуктометрической ячейки с помощью моста переменного тока, имеющего в измерительном плече последовательно включенные магазины активных сопротивлений и ёмкости.

Подготовка кондуктометрической ячейки к измерениям является важной составляющей этого метода.

2.1. МЕТОДИКА ПОДГОТОВКИ КОНДУКТОМЕТРИЧЕСКОЙ ЯЧЕЙКИ К ИЗМЕРЕНИЯМ

Для получения воспроизводимых результатов необходимо выполнить следующие операции с кондуктометрической ячейкой: тщательно промыть ячейку дистиллированной водой для удаления следов растворимых в воде солей; последовательно обработать ячейку в горячих растворах перманганата калия и щавелевой кислоты с промежуточной промывкой дистиллированной водой; промыть небольшими порциями бидистиллированной воды и исследуемого раствора; заполнить весь объём ячейки исследуемым раствором; отсеки ячейки закрыть шлифованными пробками для предотвращения уноса растворителя.

Исследуемые растворы следует приготовить из химически чистых солей и бидистиллированной воды. Хлориды калия и натрия марки «х.ч.» перед приготовлением растворов необходимо тщательно высушить. Взвесить компоненты растворов на аналитических весах с точностью до 0,0001 г. Подготовленную к эксперименту кондуктометрическую ячейку установить в воздушный или водяной термостат и выдержать перед измерениями до достижения заданной температуры.

Измерения активного сопротивления и ёмкости осуществить с помощью моста переменного тока, например Р-568, на нескольких частотах. Частоту переменного тока контролировать с помощью частотомера. Для повышения точности измерения ёмкости фильтр индикатора нуля и частоту генератора установить таким образом, чтобы вблизи положения равновесия изменение ёмкости в плече моста приводило бы к повороту эллипса, а изменение сопротивления – к сжиманию эллипса на экране электронно-лучевой трубки. Запись значений ёмкости и активного сопротивления желательнее проводить при температурах раствора, отличающихся от заданной величины не более чем на $\pm 0,25$ К.

2.2. МЕТОДИКА РАСЧЁТА СОСТАВЛЯЮЩИХ ИМПЕДАНСА

В общем случае импеданс колебательного контура рассчитывают по формуле

$$Z = [R_n^2 + (X_C - X_L)^2]^{0,5}, \quad (2.1)$$

где Z – импеданс колебательного контура, Ом; R_n – сопротивление потерь, Ом; X_C – ёмкостное сопротивление, Ом; X_L – индуктивное сопротивление, Ом.

Если считать, что сопротивление потерь компенсируется при балансировке моста магазином активных сопротивлений, то полученное значение реактивной составляющей (Z_i) равно разности ёмкостной ($X_{C,i}$) и индуктивной ($X_{L,i}$) составляющих импеданса:

$$Z_i = X_{C,i} - X_{L,i} = (2\pi f_i C_i)^{-1}, \quad (2.2)$$

где C_i – ёмкость, Ф; f_i – частота, Гц.

Считаем, что $X_{C,i} = (2\pi f_i C)^{-1}$ и $X_{L,i} = 2\pi f_i L$, тогда

$$(2\pi f_i C)^{-1} - 2\pi f_i L = (2\pi f_i C_i)^{-1} \quad (2.3)$$

$$\text{и } C^{-1} - 4\pi^2 f_i^2 L = C_i^{-1}. \quad (2.4)$$

Заменив в уравнении (2.4) C^{-1} на A , а $4\pi^2 L$ на B , получим

$$A - B f_i^2 = C_i^{-1}. \quad (2.5)$$

Измерив C_i на нескольких частотах переменного тока, рассчитываем значения ёмкости (C) и индуктивности (L) «колебательного контура» кондуктометрической ячейки.

Определить искомые величины ёмкости и индуктивности можно и графическим методом. Для этого строят график зависимости C_i^{-1} от f_i^2 .

Величину (C) находят экстраполяцией полученной прямой на ось ординат, а коэффициент (B) вычисляют по уравнению

$$B = (C_2^{-1} - C_1^{-1}) / (f_2^2 - f_1^2). \quad (2.6)$$

Значения индуктивной и ёмкостной составляющих импеданса рассчитывают по уравнениям:

$$L = 0,25\pi^{-2} B; \quad (2.7)$$

$$C = A^{-1}. \quad (2.8)$$

Используя полученные значения C и L , находим резонансную частоту взаимосвязанных колебаний гидратированных ионов по формуле

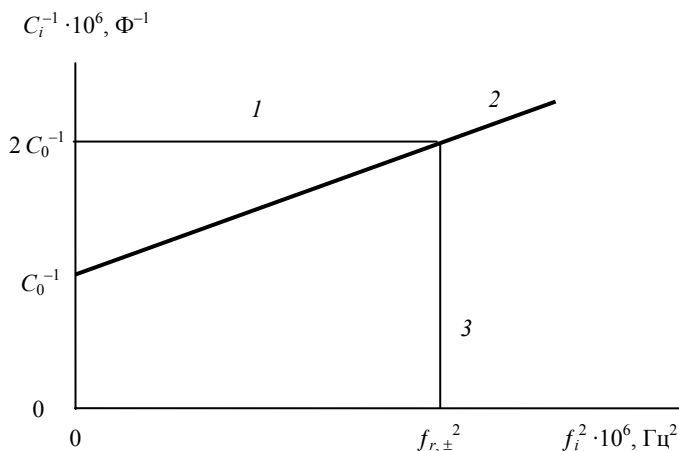
$$f_{r,\pm} = [2\pi (CL)^{0,5}]^{-1}. \quad (2.9)$$

Если сопротивление потерь не равно нулю, то наблюдается обратный наклон прямой в координатах C^{-1}, f^2 . Сопротивление потерь можно найти, построив график зависимости Z от f .

Учёт сопротивления потерь колебательного контура приводит к «повороту» прямой в координатах C^{-1}, f_i^2 , причём угловой коэффициент этой прямой по модулю и значение C^{-1} , отсекаемое на оси ординат, остаются теми же. Поэтому расчёты по уравнениям (2.7) – (2.9) приводят к тем же значениям L, C и $f_{r,\pm}$.

Второй вариант графического метода расчёта средней резонансной частоты колебаний гидратированных ионов состоит в следующем. Проводят горизонтальную линию 1 на высоте, равной удвоенному значению C_0^{-1} , до пересечения с прямой 2, отвечающей зависимости C_0^{-1} от f_i^2 , и опускают прямую 3 на ось абсцисс (рис. 2.1). Точка пересечения этой прямой с осью абсцисс соответствует значению квадрата средней резонансной частоты колебаний гидратированных ионов.

Рис. 2.1. График зависимости C_i^{-1} от f_i^2 для определения резонансной частоты по удвоенному значению C_0^{-1}



$$y = Bx + A, \quad (2.10)$$

где $y = C_i^{-1}$, мкФ⁻¹; $x = f^2$, кГц²; B – коэффициент, мкФ⁻¹ · кГц⁻²; $A = C_0^{-1}$, мкФ⁻¹.

Используя численные значения A и B , находим величины индуктивности (уравнение (2.7)) и резонансной частоты (уравнение (2.11)):

$$f_{r,\pm} = (A / B)^{0,5}. \quad (2.11)$$

Графический метод определения резонансной частоты колебаний гидратированных ионов, индуктивности и ёмкости можно осуществить с помощью программы Microsoft Excel. Для этого строят диаграмму и выводят уравнение линии тренда: «Формат линии тренда», «Параметры», «Показать уравнение на диаграмме». На диаграмму выводится уравнение вида

см ²	,%	%					%
	2,60 7	2,76 7					
	2,61 3	2,68 3					
0,1	2,62	2,65	2,687	0,1	2,633	3,433	3,033
0,2	0	6	2,648	0,2	2,667	3,017	2,842
0,3	2,62 7	2,64 2	2,638	0,3	2,700	2,878	2,789
0,4			2,634	0,4	2,733	2,808	2,771
0,5	2,63 3	2,63 3	2,633	0,5	2,766	2,767	2,766
0,6	2,64	2,62	2,634	0,6	2,800	2,739	2,769
0,7	0	8	2,635	0,7	2,831	2,719	2,775
0,8	2,64 7	2,62 4	2,637	0,8	2,866	2,704	2,785
0,9			2,639	0,9	2,900	2,692	2,796
	2,65 3	2,62 1					
	2,66 0	2,61 8					

Как следует из данных табл. 2.1, наименьшая ошибка определения резонансной частоты наблюдается, когда площадь поверхности электрода равна 0,5 см². Обращает на себя внимание равенство ошибок определения индуктивности и ёмкости при резонансной частоте. В реальном эксперименте воспроизводимость измерения ёмкости наблюдается с точностью 0,005 мкФ. В табл. 2.2 приведены расчётные данные для этого случая. Значения в табл. 2.1 и 2.2 приведены с точностью до третьего знака после запятой только для того, чтобы найти минимум погрешности резонансной частоты. Для практических целей следует ограничиваться значениями до второго знака после запятой.

Согласно данным табл. 2.2, минимальная ошибка определения резонансной частоты колебаний гидратированных ионов также соответствует площади поверхности электродов, равной 0,5 см². Ошибка определения резонансной частоты возрастает незначительно (на 0,14 %) по сравнению с результатами расчета, приведенными в табл. 2.1.

Средние резонансные частоты колебаний гидратированных ионов в растворах хлоридов калия и натрия лежат в области 1000...15000 Гц (см. табл. 1.1).

Для оценки ошибки определения реактивных составляющих импеданса в растворах нами рассчитаны их значения при различных резонансных частотах. Полученные данные приведены в табл. 2.2 – 2.9.

Как видно из сопоставления данных табл. 2.2 и 2.3, ошибка определения резонансной частоты снижается на 0,2 % при $s = 0,5$ см².

2.3. Относительные ошибки расчёта индуктивности, ёмкости и средней резонансной частоты

колебаний

$$(\delta C_i = 0,005 \text{ мкФ}, \delta f_i = 1 \text{ Гц},$$

$$f_{r,\pm} = 2000 \text{ Гц})$$

2.4. Относительные ошибки расчёта индуктивности, ёмкости и средней резонансной частоты

колебаний

$$(\delta C_i = 0,005 \text{ мкФ}, \delta f_i = 1 \text{ Гц},$$

$$f_{r,\pm} = 3000 \text{ Гц})$$

$s, \text{ см}^2$	$\epsilon_L, \%$	$\epsilon_C, \%$	$\epsilon_{f_{r,\pm}}, \%$	$s, \text{ см}^2$	$\epsilon_L, \%$	$\epsilon_C, \%$	$\epsilon_{f_{r,\pm}}, \%$
0,1	2,43	3,23	2,833	0,1	2,367	3,167	2,767
0,2	3	3	2,642	0,2	2,400	2,750	2,575
0,3	2,46 7	2,81 7	2,589	0,3	2,433	2,611	2,522
0,4	2,50	2,67	2,571	0,4	2,467	2,542	2,504
0,5	0	8	2,566	0,5	2,500	2,500	2,500
	2,53	2,60					

0,6	3	8	2,569	0,6	2,533	2,472	2,503
0,7	2,56	2,56	2,576	0,7	2,566	2,452	2,509
0,8	6	7	2,585	0,8	2,600	2,438	2,519
0,9	2,60	2,53	2,596	0,9	2,633	2,426	2,530
	0	9					
	2,63	2,51					
	3	9					
	2,66	2,50					
	6	4					
	2,70	2,49					
	0	2					

При увеличении площади поверхности электрода от значения $0,5 \text{ см}^2$, соответствующего минимуму ошибки расчёта резонансной частоты, ошибка определения индуктивной составляющей импеданса значительно возрастает, а ошибка нахождения ёмкостной составляющей импеданса уменьшается (табл. 2.10).

Анализ полученных данных показывает, что с увеличением резонансной частоты колебаний ионов ошибка её определения снижается. Зависимость относительной ошибки расчёта средней резонансной частоты колебаний гидратированных ионов от частоты имеет нелинейный вид. В таблице 2.11 сведены данные из табл. 2.2 – 2.9 при $s = 0,5 \text{ см}^2$.

2.5. Относительные ошибки расчёта индуктивности, ёмкости и средней резонансной частоты колебаний

$$(\delta_{C_i} = 0,005 \text{ мкФ}, \delta f_i = 1 \text{ Гц},$$

$$f_{r,\pm} = 5000 \text{ Гц})$$

2.6. Относительные ошибки расчёта индуктивности, ёмкости и средней резонансной частоты колебаний

$$(\delta_{C_i} = 0,005 \text{ мкФ}, \delta f_i = 1 \text{ Гц},$$

$$f_{r,\pm} = 7000 \text{ Гц})$$

$s, \text{ см}^2$	$\epsilon_L, \%$	$\epsilon_C, \%$	$\epsilon_{f_{r,\pm}}, \%$	$s, \text{ см}^2$	$\epsilon_L, \%$	$\epsilon_C, \%$	$\epsilon_{f_{r,\pm}}, \%$
0,1	2,31	3,11	2,713	0,1	2,290	3,090	2,690
0,2	3	3	2,522	0,2	2,324	2,674	2,500
0,3	2,24	2,69	2,469	0,3	2,357	2,535	2,446
0,4	7	7	2,451	0,4	2,390	2,465	2,428
0,5	2,38	2,55	2,446	0,5	2,424	2,424	2,424
0,6	0	8	2,450	0,6	2,457	2,396	2,426
0,7	2,41	2,48	2,456	0,7	2,490	2,376	2,433
0,8	3	8	2,465	0,8	2,524	2,361	2,442
0,9	2,44	2,44	2,476	0,9	2,557	2,350	2,543
	6	7					
	2,48	2,41					
	0	9					
	2,51	2,39					
	3	9					
	2,54	2,38					
	6	4					
	2,58	2,37					
	0	2					

2.7. Относительные ошибки расчёта индуктивности, ёмкости и средней резонансной частоты

колебаний

$$(\delta C_i = 0,005 \text{ мкФ}, \delta f_i = 1 \text{ Гц},$$

$$f_{r,\pm} = 8000 \text{ Гц})$$

$s, \text{ см}^2$	$\varepsilon_L, \%$	$\varepsilon_C, \%$	$\varepsilon_{f_{r,\pm}}, \%$
0,1	2,28	3,08	2,683
0,2	3	3	2,492
0,3	2,31	2,66	2,439
	7	7	
0,4	2,35	2,52	2,421
0,5	0	8	2,416
0,6	2,38	2,45	2,419
	3	8	
0,7	2,41	2,41	2,426
	6	7	
0,8	2,41	2,41	2,435
	6	7	
0,9	2,45	2,38	2,446
	0	9	
	2,48	2,36	
	3	9	
	2,51	2,35	
	6	4	
	2,55	2,34	
	0	2	

2.8. Относительные ошибки расчёта индуктивности, ёмкости и средней резонансной частоты

колебаний

$$(\delta C_i = 0,005 \text{ мкФ}, \delta f_i = 1 \text{ Гц},$$

$$f_{r,\pm} = 9000 \text{ Гц})$$

$s, \text{ см}^2$	$\varepsilon_L, \%$	$\varepsilon_C, \%$	$\varepsilon_{f_{r,\pm}}, \%$
0,1	2,278	3,078	2,678
0,2	2,311	2,661	2,486
0,3	2,344	2,522	2,433
0,4	2,378	2,453	2,415
0,5	2,411	2,411	2,411
0,6	2,444	2,383	2,414
0,7	2,478	2,363	2,420
0,8	2,510	2,349	2,430
0,9	2,544	2,337	2,440

2.9. Относительные ошибки расчёта индуктивности, ёмкости и средней резонансной частоты колебаний

частоты колебаний

$$(\delta C_i = 0,005 \text{ мкФ}, \delta f_i = 1 \text{ Гц},$$

$$f_{r,\pm} = 10000 \text{ Гц})$$

$s, \text{ см}^2$	$\varepsilon_L, \%$	$\varepsilon_C, \%$	$\varepsilon_{f_{r,\pm}}, \%$
0,1	2,27	3,07	2,673
	3	3	
0,2	2,30	2,65	2,482
	7	7	
0,3	2,30	2,65	2,429
	7	7	
0,4	2,34	2,51	2,411
	0	8	
0,5	2,37	2,44	2,407
	3	8	
0,6	2,37	2,44	2,409
	3	8	
0,7	2,40	2,40	2,415
	6	7	
0,8	2,40	2,40	2,425
	6	7	
0,9	2,44	2,37	2,436
	0	9	

2.10. Относительные ошибки расчёта индуктивности, ёмкости и средней резонансной частоты колебаний

колебаний

$$(\delta C_i = 0,005 \text{ мкФ}, \delta f_i = 1 \text{ Гц},$$

$$f_{r,\pm} = 1000 \text{ Гц})$$

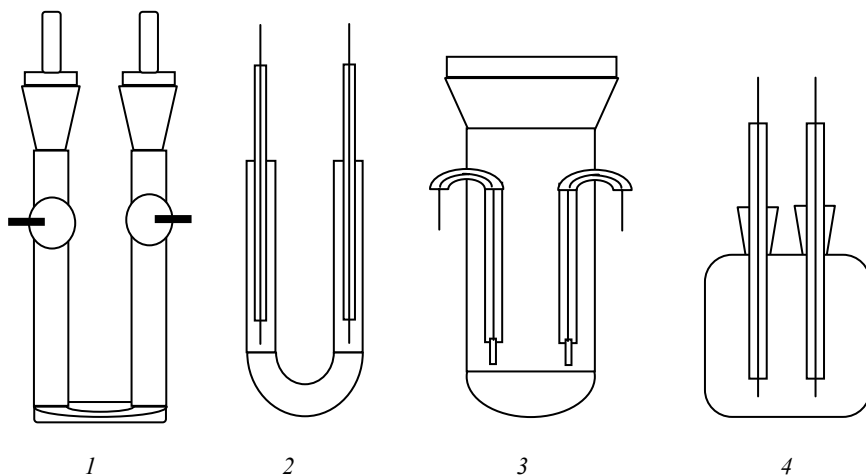
$s, \text{ см}^2$	$\varepsilon_L, \%$	$\varepsilon_C, \%$	$\varepsilon_{f_{r,\pm}}, \%$
0,01	2,603	10,93	6,768
		3	
0,04	2,613	4,683	3,648
1,01	2,936	2,682	2,810
2,01	3,270	2,641	2,955
3,01	3,603	2,628	3,115
4,01	3,936	2,621	3,278
5,01	4,269	2,617	3,443
6,01	4,602	2,614	3,608
7,01	4,936	2,613	3,774
8,01	5,269		3,940

	2,47 3	2,35 9				2,610	
	2,50 6	2,34 4					
	2,54 0	2,33 2					

2.11. Значения относительных ошибок расчёта резонансной частоты колебаний при различных её значениях

$$(\delta c_i = 0,005 \text{ мкФ}, \delta f_i = 1 \text{ Гц}, s = 0,5 \text{ см}^2)$$

$f_{r,\pm}$ Гц	1000	2000	3000	5000	7000	8000	9000	10000
$\varepsilon_{f_{r,\pm}}$, %	2,766	2,566	2,500	2,446	2,424	2,416	2,411	2,407



Ошибка определения составляющих импеданса менее 5 % наблюдается при площади поверхности электродов 0,04...7 см².

Таким образом, наиболее точные результаты расчёта получаются при использовании электродов с площадью поверхности 0,5 см², а приемлемыми для определения реактивных составляющих импеданса и резонансной частоты колебаний являются электроды с площадью поверхности 0,04...7 см². Выбор площади поверхности электрода ограничивается необходимостью одновременного измерения активного и реактивного сопротивления.

При малых значениях площади поверхности электрода значительно возрастает активное сопротивление раствора электролита, а при больших – значительно возрастает ёмкость, и сбалансировать мост переменного тока не удаётся.

2.4. ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА КОНСТРУКЦИИ КОНДУКТОМЕТРИЧЕСКОЙ ЯЧЕЙКИ

В данном разделе рассматривается вопрос о влиянии конструкции кондуктометрической ячейки на результаты измерения и расчета активной и реактивной (ёмкостной и индуктивной) составляющих импеданса, а также средней резонансной частоты колебаний гидратированных ионов [8].

Для установления возможности применения кондуктометрических ячеек различной конструкции для нахождения средних резонансных частот колебаний гидратированных ионов сильных электролитов были проведены измерения реактивной составляющей импеданса в ячейках, выполненных из стекла марки «Пирекс» (рис. 2.2).

Ячейка первого типа (1), содержит трубку с внутренним диаметром 2 мм, впаянную между двумя вертикальными коленами. В верхней части вертикальных колен в шарообразных утолщениях впаяны платиновые электроды диаметром 1 мм и длиной 10 мм. Длина рабочей части электрода составляет 3 мм. Ячейка закрывается пришлифованными пробками, выполненными из того же стекла. Расстояние между электродами и объём рабочей части ячейки фиксированы.

Рис. 2.2. Схематическое изображение конструкций ячеек:

1 – ячейка первого типа; 2 – ячейка второго типа;
3 – ячейка третьего типа; 4 – ячейка четвёртого типа
(пояснения даны в тексте)

Ячейка второго типа (2) представляет собой U-образную трубку. В верхней части колен трубки установлены фторопластовые пробки, через которые вводятся платиновые электроды, впаянные в стеклянные трубки. Электроды могут устанавливаться на различной высоте (l). Такая ячейка позволяет исследовать влияние расстояния между электродами на значения составляющих импеданса.

Ячейка третьего типа (3) представляет собой пробирку с впаянными платиновыми электродами. Рабочая часть электродов выполнена из платиновых пластинок с площадью поверхности около 1 см². Ячейка герметично закрывается полиэтиленовой пробкой. Эта ячейка является классической и широко используется в практике измерения удельной электропроводности растворов электролитов.

Ячейка четвёртого типа (4) выполнена в виде плоскодонной колбы. Через фторопластовые пробки вводятся платиновые электроды, которые устанавливаются на постоянном расстоянии друг от друга. Платиновые электроды имеют такую же конструкцию, что и электроды в ячейке второго типа.

В таблицах 2.12 – 2.17 приведены данные измерений и расчёта активного сопротивления, ёмкости, индуктивности и средней резонансной частоты колебаний гидратированных ионов для растворов KCl в ячейках описанных типов.

На рисунках 2.3 – 2.8 показаны полученные зависимости C^{-1} от квадрата частоты налагаемого переменного тока.

Анализ полученных данных показывает, что линейность зависимости $C^{-1} - f^2$ наблюдается только в ячейке первого типа. Наблюдающийся эффект может быть объяснён наличием в ячейке первого типа сосредоточенного сопротивления на участке с малым внутренним диаметром трубки (l , рис. 2.2), который ослабляет взаимную связь двух

2.12. Результаты измерения в ячейке первого типа
(0,1 м раствор KCl, 298 К)

f , Гц	R_i , Ом	C_i , мкФ	L , Гн	C_0 , мкФ	$f_{r,\pm}$, Гц
800	9586	0,493	0,0166	0,6164	1573
1200	9580	0,392			
1600	9587	0,300			
2000	9564	0,235			
2400	9560	0,186			
2800	9602	0,148			
3200	9602	0,120			

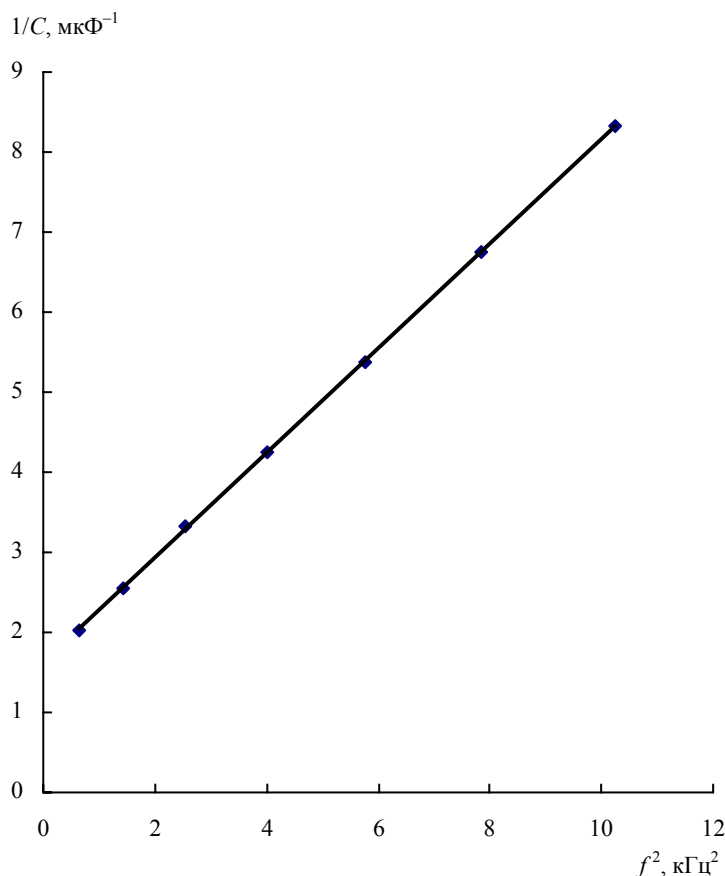


Рис. 2.3. Зависимость $1/C$ от f^2 (ячейка I; 0,1 м раствор KCl)

2.13. Результаты измерения в ячейке второго типа
(0,1 м раствор KCl, 298 К, $l = 171$ мм)

f , Гц	R_i , Ом	C_i , мкФ	L , Гн	C_0 , мкФ	$f_{r,\pm}$, Гц
800	1421,00	0,62628	–	–	1476
1200	1405,01	0,59532			
1600	1398,01	0,56975			
2000	1393,00	0,54811			
2400	1389,00	0,52810			

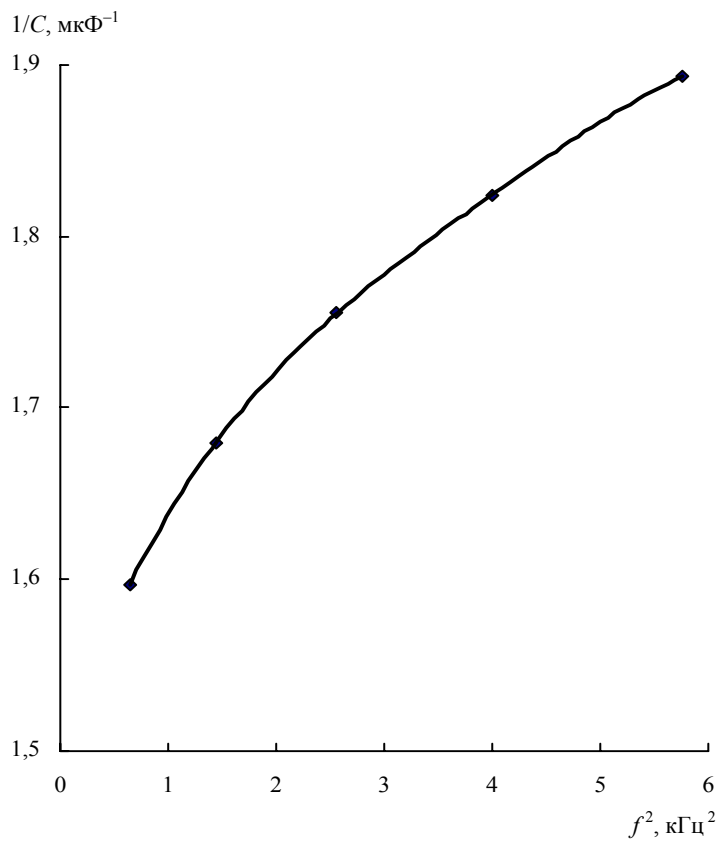


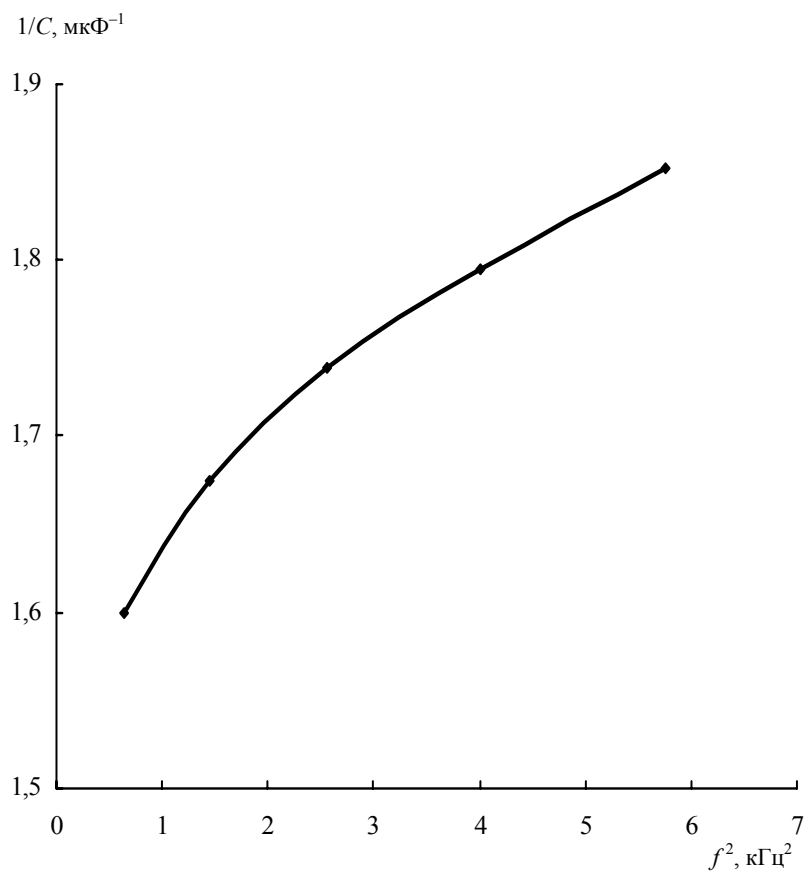
Рис. 2.4. Зависимость $1/C$ от f^2
(ячейка 2; 0,1 м раствор KCl, $l = 171$ мм)

2.14. Результаты измерения в ячейке второго типа
(0,1 м раствор KCl, 298 К, $l = 111$ мм)

f , Гц	R_i , Ом	C_i , мкФ	L , Гн	C_0 , мкФ	$f_{r, \pm}$, Гц
800	950,01	0,62528	—	—	1459
1200	936,01	0,59696			
1600	929,00	0,57500			
2000	924,00	0,55700			
2400	920,00	0,54000			

Рис. 2.5. Зависимость
(ячейка 2; 0,1 *m* раствор

2.15. Результаты
второго типа
(0,1 *m* раствор KCl,



$1/C$ от f^2
KCl, $l = 111$ мм)

измерения в ячейке

298 К, $l = 51$ мм)

f , Гц	R_i , Ом	C_i , мкФ	L , Гн	C_0 , мкФ	$f_{r, \pm}$, Гц
800	452,11	0,52343	—	—	1485
1200	438,13	0,59757			
1600	430,10	0,57894			
2000	425,12	0,56300			
2400	422,12	0,55000			

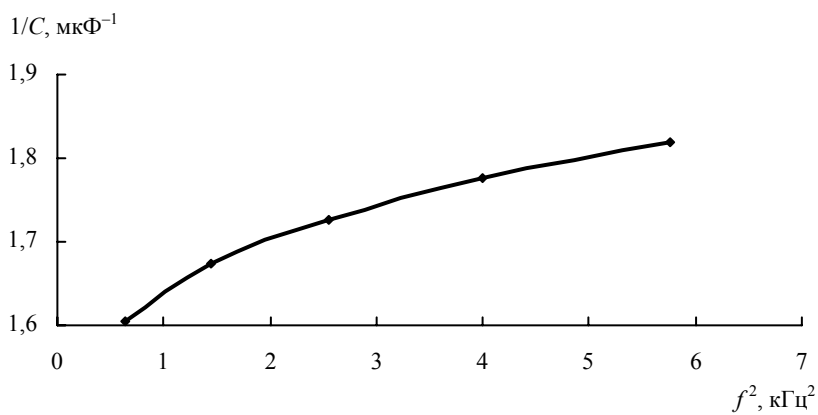


Рис. 2.6. Зависимость $1/C$ от f^2
(ячейка 2; 0,1 *m* раствор KCl, 298 К, $l = 51$ мм)

2.16. Результаты измерения в ячейке третьего типа
(0,1 *m* раствор KCl, 298 К)

f , Гц	R_i , Ом	C_i , мкФ	L , Гн	C_0 , мкФ	$f_{r,\pm}$, Гц
800	53,13	4,826	—	—	1524
1200	51,82	4,620			
1600	51,01	4,448			
2000	50,42	4,300			
2400	50,04	4,176			

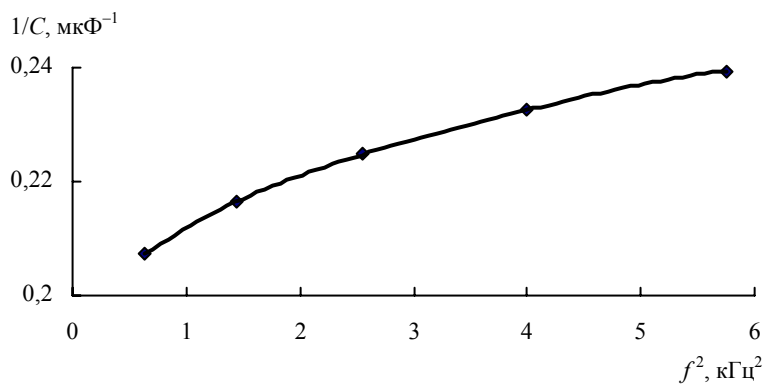


Рис. 2.7. Зависимость $1/C$ от f^2
(ячейка 3; 0,1 *m* раствор KCl, 298 К)

2.17. Результаты измерения в ячейке четвёртого типа
(0,1 м раствор KCl, 298 К)

f , Гц	R_i , Ом	C_i , мкФ	L , Гн	C_0 , мкФ	$f_{r,\pm}$, Гц
800	206,90	0,675	—	—	1546
1200	193,10	0,649			
1600	186,20	0,632			
2000	182,00	0,618			
2400	179,20	0,606			
2800	177,15	0,597			
3200	175,56	0,588			

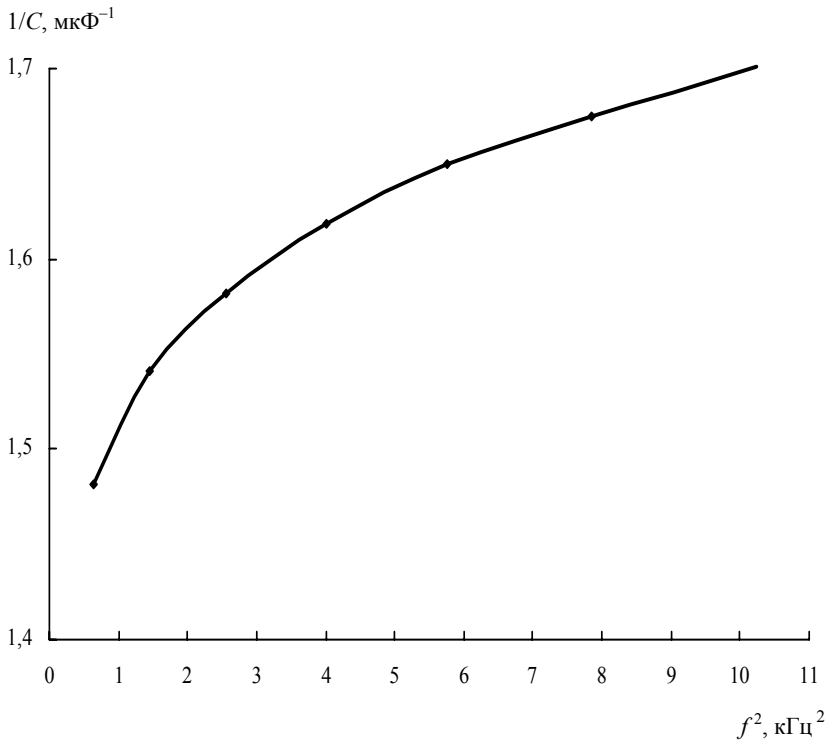


Рис. 2.8. Зависимость $1/C$ от f^2
(ячейка 4; 0,1 м раствор KCl, 298 К)

колебательных контуров. В остальных ячейках данная зависимость криволинейна. Это обстоятельство, по-видимому, свидетельствует о более сильном влиянии электродов друг на друга в ячейках второго, третьего и четвёртого типа. Найти значение средней резонансной частоты колебаний гидратированных ионов можно следующим образом. Проводят две касательные к полученной кривой: одну в области частот 800...1200 Гц, а вторую – 2400...3600 Гц. Пересечение касательных даёт значение квадрата средней резонансной частоты колебаний гидратированных ионов.

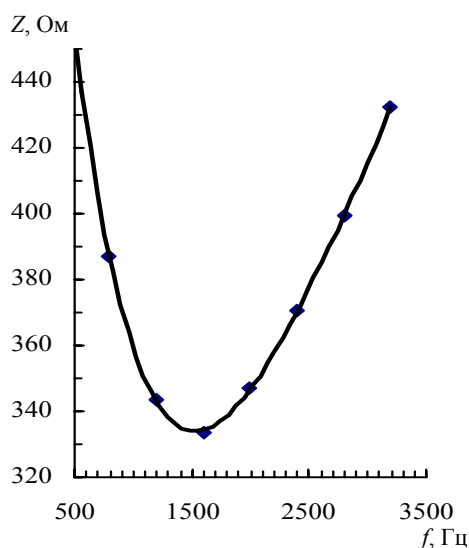


Рис. 2.9. Зависимость импеданса от частоты переменного тока
(0,1 м КСl, 298 К)

Результаты измерений в ячейке первого типа позволяют проводить расчёты реактивных составляющих импеданса и средней резонансной частоты колебаний гидратированных ионов по формулам, приведённым в разделе 2.2. Экспериментальные значения $f_{r,\pm}$ удовлетворительно совпадают с рассчитанными величинами (табл. 1.1.).

Полученная нами зависимость импеданса кондуктометрической ячейки от частоты переменного тока имеет минимум при значении резонансной частоты колебаний гидратированных ионов хлорида калия в 0,1 м растворе при 298 К (рис. 2.9). Такой вид зависимости импеданса от частоты наблюдается, как известно, в случае последовательного колебательного контура с наличием сопротивления потерь. В данном случае сопротивление потерь равно 334 Ом.

Таким образом, нами экспериментально подтверждена правомочность использования показанной на рис. 1.2 электрической схемы замещения кондуктометрической ячейки.

С целью нахождения доверительного интервала измерения ёмкости и ошибки расчета ёмкости, индуктивности и средней резонансной частоты по экспериментальным данным была изготовлена физическая модель кондуктометрической ячейки (рис. 2.10), с использованием которой было произведено десять измерений ёмкости на частотах 998...4998 Гц.



Рис. 2.10. Физическая модель кондуктометрической ячейки
($C = 0,5$ мкФ, $L = 488$ мкГн, $R = 240$ Ом)

На основании экспериментальных данных были вычислены средние значения ёмкости и отклонения отдельных значений ёмкости от среднеарифметической величины (табл. 2.18).

2.18. Измеренные значения ёмкости на различных частотах

f , Гц	998	1997	2997	3996	4998
C_i , мкФ	0,51056	0,52341	0,54826	0,58900	0,65258
	0,51032	0,5234	0,54828	0,58922	0,65263
	0,51025	0,52335	0,54837	0,58925	0,65268
	0,51052	0,52337	0,54816	0,58919	0,65251
	0,51063	0,52352	0,54829	0,58922	0,65243
	0,51067	0,52338	0,54833	0,58930	0,65255
	0,51044	0,52328	0,54835	0,58931	0,65261
	0,51037	0,5232	0,54825	0,58926	0,65268
	0,51049	0,52325	0,54819	0,5892	0,65272
	0,51055	0,52324	0,54821	0,58923	0,65270
\bar{C} , мкФ	0,51048	0,52334	0,548269	0,589218	0,652609

Так как дисперсия неизвестна, то для её определения мы использовали общеизвестную формулу $S^2[c] = (\sum p_i^2) / (n - 1)$. Дисперсия действительного значения измеряемой величины связана с дисперсией ($S^2[\bar{c}]$) уравнением $S^2[\bar{c}] = S^2[c] / n$.

Для нахождения доверительного интервала применены формулы

$$c_{и} = c \pm t_p(f) \text{ и } S[c] = c \pm t_p(f) \{S[c] / n^{0,5}\}.$$

При доверительной вероятности $p = 0,95$ и числе степеней свободы $f = 10$ значение функции $t_p(f)$ равно 2,2281. Значения искомых величин приведены в табл. 2.19.

2.19. Величины ρ_i , $S^2[c]$, $S^2[\bar{c}]$ и $c_{и}$ для различных частот

f , Гц	998	1997	2997	3996	4998
ρ_i , мкФ	$8 \cdot 10^{-5}$	$7 \cdot 10^{-5}$	$-9 \cdot 10^{-6}$	$-22 \cdot 10^{-5}$	$-2,9 \cdot 10^{-5}$
	$-16 \cdot 10^{-5}$	$6 \cdot 10^{-5}$	$1,1 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-6}$	$2,1 \cdot 10^{-5}$
	$-23 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$10 \cdot 10^{-5}$	$3,2 \cdot 10^{-5}$	$7,1 \cdot 10^{-5}$
	$4 \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^{-5}$	$-11 \cdot 10^{-5}$	$-2,8 \cdot 10^{-5}$	$-9,9 \cdot 10^{-5}$
	$15 \cdot 10^{-5}$	$18 \cdot 10^{-5}$	$2,1 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-6}$	$-18 \cdot 10^{-5}$
	$19 \cdot 10^{-5}$	$4 \cdot 10^{-5}$	$6,1 \cdot 10^{-5}$	$8,2 \cdot 10^{-5}$	$-5,9 \cdot 10^{-5}$
	$-4 \cdot 10^{-5}$	$-6 \cdot 10^{-5}$	$8,1 \cdot 10^{-5}$	$9,2 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-6}$
	$11 \cdot 10^{-5}$	$-14 \cdot 10^{-5}$	$-1,9 \cdot 10^{-5}$	$4,2 \cdot 10^{-5}$	$7,1 \cdot 10^{-5}$
	$1 \cdot 10^{-5}$	$-9 \cdot 10^{-5}$	$-7,9 \cdot 10^{-5}$	$-1,8 \cdot 10^{-5}$	$11 \cdot 10^{-5}$
	$7 \cdot 10^{-5}$	$-10 \cdot 10^{-5}$	$-5,9 \cdot 10^{-5}$	$1,2 \cdot 10^{-5}$	$9,1 \cdot 10^{-5}$
$S^2[c]$, мкФ ²	$1,820 \cdot 10^{-8}$	$9,422 \cdot 10^{-8}$	$4,788 \cdot 10^{-8}$	$7,418 \cdot 10^{-8}$	$8,588 \cdot 10^{-8}$
$S^2[\bar{c}]$, мкФ ²	$1,820 \cdot 10^{-9}$	$9,422 \cdot 10^{-10}$	$4,788 \cdot 10^{-10}$	$7,418 \cdot 10^{-10}$	$8,588 \cdot 10^{-10}$
$c_{и}$, мкФ	$0,51048 \pm \pm 9,51 \cdot 10^{-5}$	$0,52334 \pm \pm 6,84 \cdot 10^{-5}$	$0,54827 \pm \pm 4,88 \cdot 10^{-5}$	$0,58922 \pm \pm 6,07 \cdot 10^{-5}$	$0,65261 \pm \pm 6,53 \cdot 10^{-5}$

В таблице 2.20 приведены данные измерения ёмкости модели ячейки (рис. 2.10) в широком диапазоне частот.

Зависимость C^{-1} от квадрата частоты переменного тока показана на рис. 2.11. Эта зависимость (также как и для данных полученных при измерениях с использованием кондуктометрической ячейки первого типа с растворами хлоридов щелочных металлов) линейна и описывается уравнением ($r^2 = 0,9998$)

$$C^{-1} = 2,0042 - 0,0189 f^2.$$

С использованием этого уравнения и уравнений (2.6) – (2.9) в соответствии с разработанной нами методикой рассчитаны значения емкости колебательного контура (0,499 мкФ), индуктивности (479 мкГн) и резонансной частоты (10298 Гц).

2.20. Экспериментальные данные измерений в диапазоне 2995...10196 Гц

f , Гц	f^2 , кГц ²	C , мкФ	C^{-1} , мкФ ⁻¹
2995	8,970025	0,54750	1,826484018
3997	15,976009	0,58900	1,697792869
4996	24,960016	0,65405	1,528935097
5999	35,988001	0,75330	1,327492367
6999	48,986001	0,92470	1,081431816
7997	63,952009	1,25365	0,797670801
9000	81,000000	2,15000	0,465116279
9105	82,901025	2,21080	0,452324950
9202	84,676804	2,45020	0,408129949
9301	86,508601	2,70315	0,369938775
9498	90,212004	3,30315	0,302741323
9796	95,961616	5,20320	0,192189422
9995	99,900025	9,50320	0,105227713
10096	101,929216	15,51700	0,064445447
10196	103,958416	54,51700	0,018342902

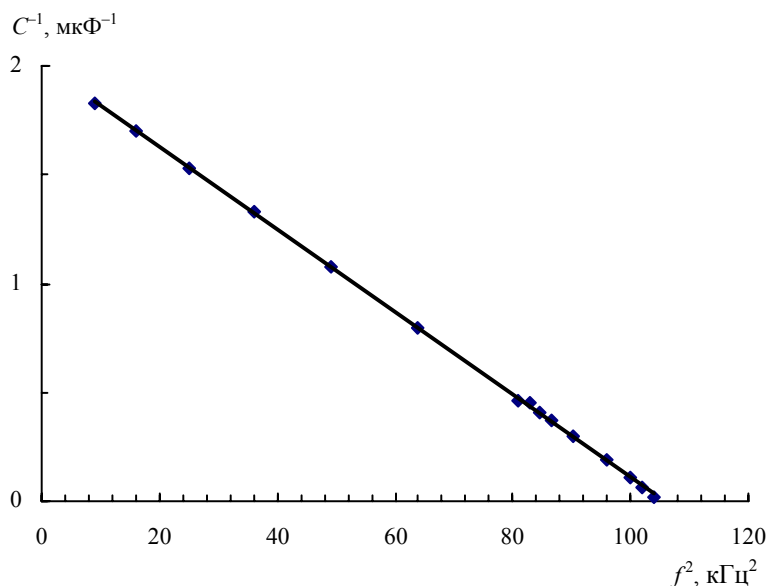


Рис. 2.11. Зависимость $1/C$ от f^2
(для модели ячейки, показанной на рис. 2.10)

Резонансная частота колебательного контура (рис. 2.10), рассчитанная по формуле Томсона, равна 10189 Гц.

Относительные ошибки измерения ёмкости, индуктивности и резонансной частоты составили соответственно 0,20; 1,1 и 1,8 %.

Приведенные результаты расчетов показывают, что принятые нами допущения при разработке физической и математической модели колебательных процессов в двойном электрическом слое справедливы.

На рисунке 2.12 показана зависимость импеданса модельного колебательного контура от частоты переменного тока. Минимум полученной кривой соответствует частоте примерно 10700 Гц. Обращает на себя внимание хорошее совпадение значения резонансной частоты, определенное по минимуму этой кривой, со значением 10519 Гц, рассчитанным по усредненным величинам емкости (табл. 2.18). Расхождение этих данных составляет 1,7 %.

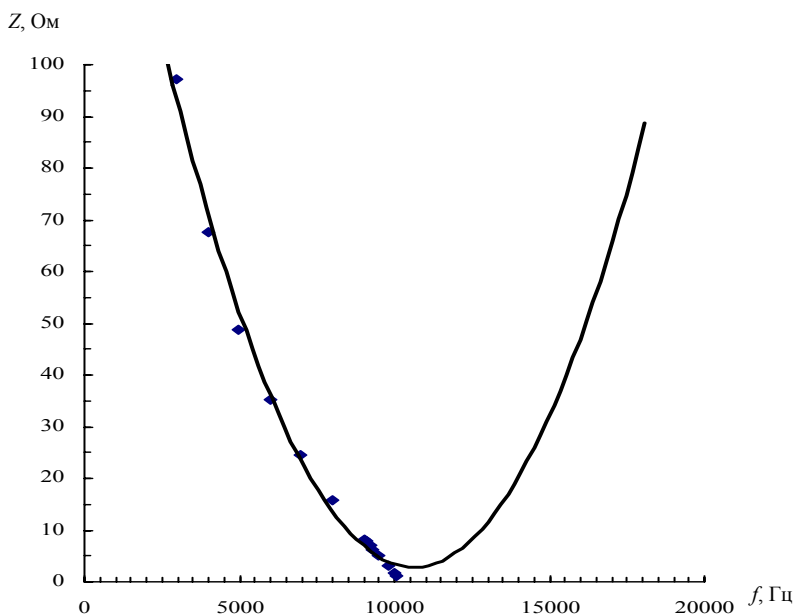


Рис. 2.12. Зависимость импеданса модели колебательного контура от частоты, построенной на основе данных табл. 2.20

Таким образом, изложенный в данном разделе метод экспериментального определения реактивных составляющих импеданса и средней резонансной частоты колебаний гидратированных ионов обладает достаточной точностью.

3. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ И ТЕМПЕРАТУРЫ РАСТВОРОВ ЭЛЕКТРОЛИТОВ НА РЕАКТИВНЫЕ СОСТАВЛЯЮЩИЕ ЭЛЕКТРОДНОГО ИМПЕДАНСА И СРЕДНИЕ РЕЗОНАНСНЫЕ ЧАСТОТЫ КОЛЕБАНИЙ ГИДРАТИРОВАННЫХ ИОНОВ

3.1. ВЛИЯНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ И ТЕМПЕРАТУРЫ РАСТВОРОВ ХЛОРИДА КАЛИЯ НА ВЕЛИЧИНЫ СРЕДНЕЙ РЕЗОНАНСНОЙ ЧАСТОТЫ КОЛЕБАНИЙ ГИДРАТИРОВАННЫХ ИОНОВ И РЕАКТИВНЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ ИМПЕДАНСА

Согласно данным, приведенным в разделе 2, концентрация и температура растворов электролитов оказывают заметное влияние на величину измеряемого импеданса.

Зависимость импеданса от частоты колебаний сопротивления потерь. С в колебательном контуре колебаний гидратированных ионов сопротивлений потерь и средних ионов хлорида калия (0,1 м КСl), табл. 3.1.

3.1. Резонансные частоты и сопротивления потерь

T, K	$f_{r, \pm}, Гц$	$R_p, Ом$
298	1515	334
303	1600	307
308	1770	286
313	2030	250

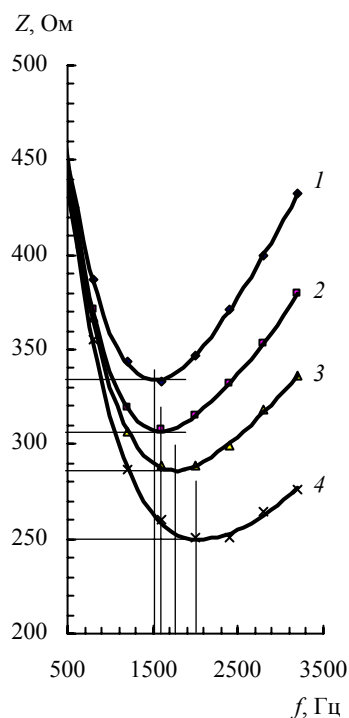


Рис. 3.1. Зависимость импеданса от частоты (0,1 м КСl) при различных температурах: 1 – 298, 2 – 303, 3 – 308, 4 – 313 К

частоты переменного тока имеет экстремальный кривых соответствует средней резонансной гидратированных ионов и значению увеличением температуры сопротивление потерь снижается, а средняя резонансная частота хлорида калия возрастает. Величины резонансных частот колебаний гидратированных определенных графическим методом приведены в

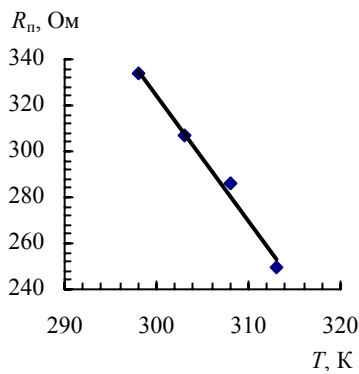


Рис. 3.2. Зависимость сопротивления потерь от температуры

Зависимость сопротивления потерь от температуры имеет линейный вид (рис. 3.2) и описывается уравнением

$$R_{\text{п}} = 1962,3 - 5,46 T.$$

Доверительная вероятность аппроксимации равна 0,9888.

Использование графика зависимости импеданса от частоты позволяет определить средние резонансные частоты колебаний гидратированных ионов лишь приблизительно, так как минимум этой кривой размыт.

Поэтому обработку экспериментальных данных, представленных в прил. 1, мы осуществляли по методике, изложенной в разделе 2.

Полученные нами [10, 11] экспериментальные значения реактивных составляющих импеданса кондуктометрической ячейки с растворами хлорида калия и средних резонансных частот колебаний гидратированных ионов калия и хлора при различных концентрациях и температурах приведены в табл. 3.2.

3.2. Индуктивность и ёмкость кондуктометрической ячейки и средние резонансные частоты колебаний гидратированных ионов калия и хлора

m , моль/кг	T , К	Диапазон частот f_r , Гц	L , Гн	C_0 , мкФ	$f_{r, \pm}$, Гц
0,1	298	1200...3200	0,017597	0,631512	1510
	303	1200...3200	0,015046	0,637959	1624
	308	1200...3200	0,012827	0,626292	1776
	313	1200...3200	0,009767	0,623752	2039
0,2	298	1200...3200	0,004899	0,695604	2726
	303	800...6000	0,004053	0,682128	3027
	308	800...6000	0,003412	0,678518	3309
	313	4000...6000	0,002872	0,652188	3677
0,6	298	1200...3200	0,000778	0,746157	6607
	303	800...6000	0,000605	0,742280	7508
	308	800...6000	0,000522	0,722648	8196
	313	4000...6000	0,000428	0,702198	9180

Продолжение табл. 3.2.

m , моль/кг	T , К	Диапазон частот f_r , Гц	L , Гн	C_0 , мкФ	$f_{r, \pm}$, Гц
0,7	298	1200...3200	0,000618	0,701902	7641
	303	800...6000	0,000474	0,700378	8738
	308	800...6000	0,000400	0,704722	9477
	313	4000...6000	0,000329	0,703829	10454
0,9	298	2000...4000	0,000382	0,756372	9357
	303	800...6000	0,000314	0,748839	10378
	308	800...6000	0,000274	0,737409	11206
	313	2800...6000	0,000223	0,719166	12570
1,0	298	1600...4800	0,000377	0,670736	10003
	303	4000...6000	0,000294	0,678518	11272
	308	4000...6000	0,000228	0,675721	12823
	313	4000...6000	0,000200	0,695991	13486

Согласно данным табл. 3.2, реактивные составляющие импеданса кондуктометрической ячейки и средняя резонансная частота колебаний гидратированных ионов калия и хлора по-разному изменяются с ростом концентрации. Графики зависимостей средней резонансной частоты колебаний гидратированных ионов и индуктивности от концентрации показаны на рис. 3.3 и рис. 3.4. Средняя резонансная частота колебаний гидратированных ионов калия и хлора (рис. 3.3) увеличивается с ростом концентрации по степенному закону.

Наблюдается существенное увеличение значений резонансной частоты с ростом температуры: для 0,1 m раствора KCl увеличение температуры на 15 К приводит к изменению средней резонансной частоты колебаний гидратированных ионов на 529 Гц; для 0,2 m раствора – на 951 Гц; для 0,6 m – на 2573 Гц; для 0,7 m – на 2813 Гц; для 0,9 m – на 3213 Гц; для 1,0 m – на 3483 Гц.

Уравнение, описывающее влияние температуры и концентрации на величину средней резонансной частоты колебаний гидратированных ионов хлора и калия имеет вид $f_{r, \pm} = (242,46 T - 62055) m^{0,8342}$.

Индуктивность с ростом концентрации и температуры уменьшается (рис. 3.4).

Уравнения зависимостей L и $f_{r,\pm}$ от концентрации при различных температурах и величины достоверности аппроксимации приведены в табл. 3.3.

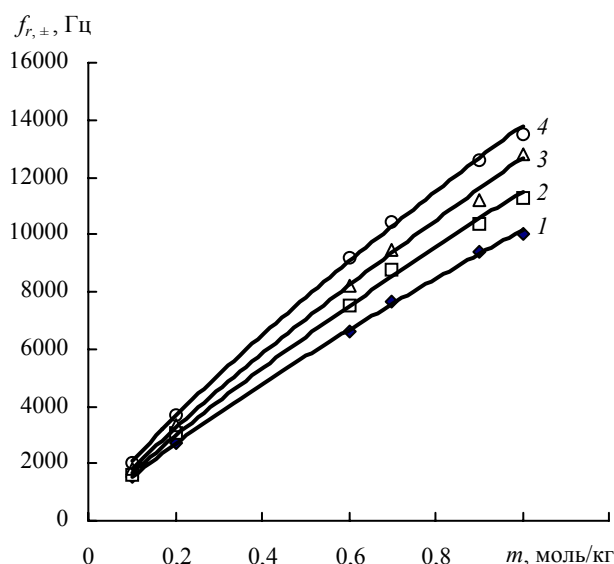


Рис. 3.3. Зависимости средней резонансной частоты колебаний гидратированных ионов хлора и калия от концентрации при различных температурах:
1 – 298 К; 2 – 303 К; 3 – 308 К; 4 – 313 К

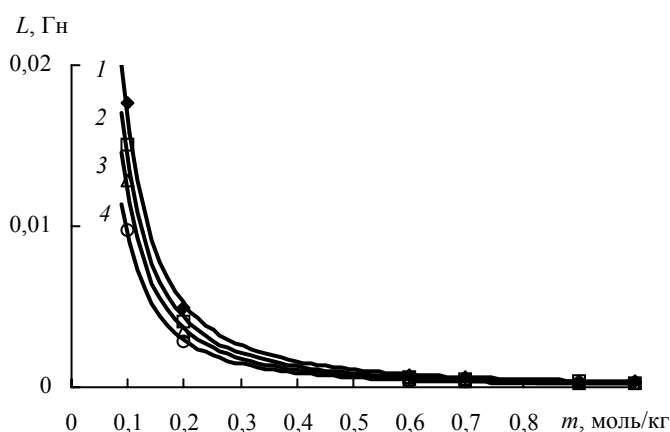


Рис. 3.4. Зависимости индуктивности от концентрации при различных температурах:
1 – 298 К; 2 – 303 К; 3 – 308 К; 4 – 313 К

3.3. Уравнения зависимостей индуктивности и средней резонансной частоты колебаний гидратированных ионов калия и хлора от концентрации раствора

T, K	$L = f(m), \text{Гн}$	$f_{r,\pm} = f(m), \text{Гц}$	r^2_L	$r^2_{f_{r,\pm}}$
298	$L = 0,0003 m^{-1,6931}$	$f_{r,\pm} = 10137 m^{0,8233}$	0,998	1,000
303	$L = 0,0003 m^{-1,7291}$	$f_{r,\pm} = 11491 m^{0,8416}$	0,998	0,999
308	$L = 0,0002 m^{-1,7410}$	$f_{r,\pm} = 12646 m^{0,8460}$	0,999	0,999
313	$L = 0,0002 m^{-1,7085}$	$f_{r,\pm} = 13793 m^{0,8257}$	0,999	1,000

Такое поведение индуктивной составляющей импеданса и средней резонансной частоты колебаний гидратированных ионов может быть объяснено значительным уменьшением вязкости растворов электролитов и молекулярных масс гидратированных ионов хлора и калия с ростом концентрации раствора.

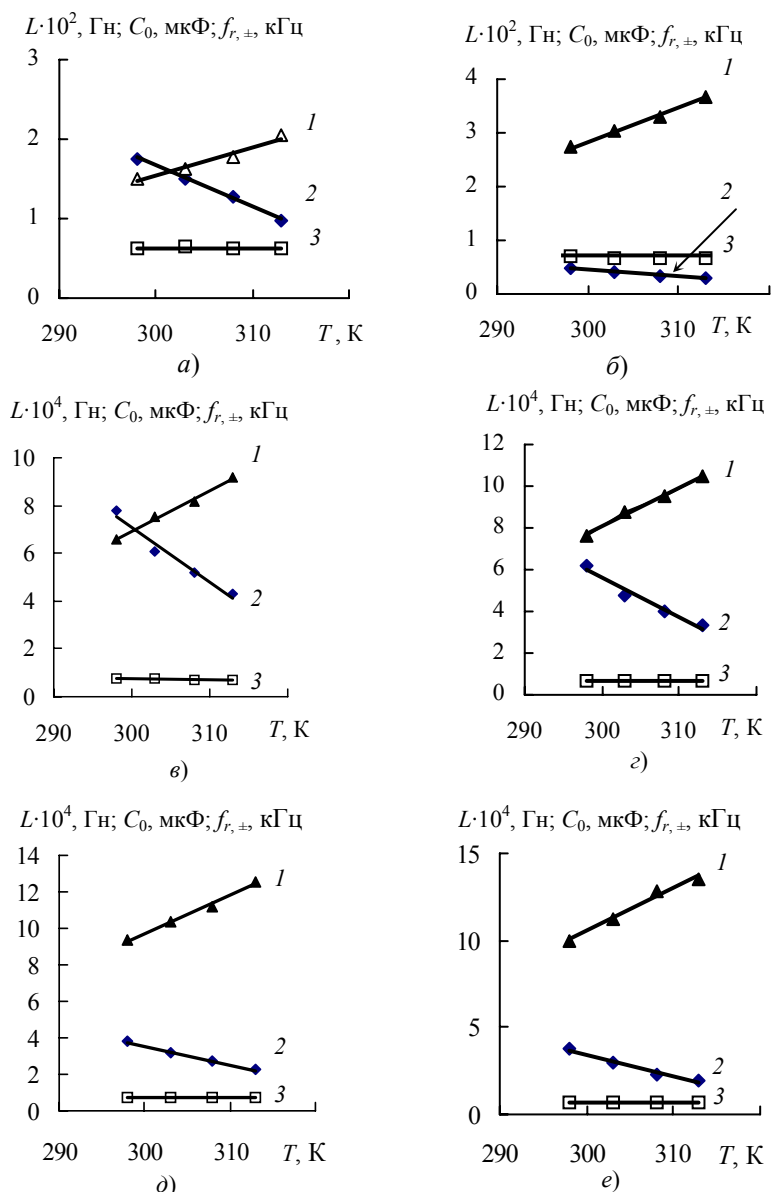
Графики зависимостей индуктивности, средней резонансной частоты колебаний гидратированных ионов хлорида калия и емкости от температуры приведены на рис. 3.5.

Показанные на рис. 3.5 зависимости имеют линейный вид. Средняя резонансная частота колебаний гидратированных ионов калия и хлора (прямые 1a...1e) увеличивается с ростом температуры, а индуктивная составляющая импеданса – уменьшается (2a...2e). Такое поведение индуктивной составляющей импеданса и средней резонансной частоты колебаний

гидратированных ионов может быть объяснено значительным уменьшением вязкости растворов электролитов и увеличением подвижности ионов.

Обращает на себя внимание практически полное отсутствие влияния концентрации на значение емкости C_0 (прямые 3а...3е). Средняя величина ее равна 0,68 мкФ. Это факт можно объяснить тем, что площадь поверхности электродов кондуктометрической ячейки из-за низких значений коэффициентов линейного и объемного расширения платины постоянна.

Уравнения зависимостей индуктивности и средней резонансной частоты колебаний гидратированных ионов от температуры для растворов хлорида калия с различной концентрацией и величины достоверности аппроксимации r^2_L и $r^2_{f_{r,\pm}}$ приве-



дены в табл. 3.4.

Рис. 3.5. Зависимости средней резонансной частоты колебаний (1) гидратированных ионов хлора и калия, индуктивности (2) и емкости (3) от температуры в растворах с концентрацией (моль/кг): а – 0,1; б – 0,2; в – 0,6; г – 0,7; д – 0,9; е – 1,0

3.4. Уравнения зависимостей индуктивности и средней резонансной частоты колебаний гидратированных ионов калия и хлора от температуры при различных концентрациях растворов хлорида калия

m , МОЛЬ/КГ	$L = f(T)$, Гн	$f_{r,\pm} = f(T)$, кГц	r^2_L	$r^2_{f_{r,\pm}}$
0,1	$(17,089 - 0,0514 T) 10^{-2}$	$0,0348 T - 8,888$	0,996	0,963
0,2	$(4,488 - 0,0134 T) 10^{-2}$	$0,0627 T - 15,97$	0,990	0,997
0,6	$(75,059 - 0,2266 T) 10^{-4}$	$0,168 T - 43,494$	0,969	0,996
0,7	$(62,048 - 0,1882 T) 10^{-4}$	$0,1836 T - 47,00$	0,966	0,995
0,9	$(34,571 - 0,1034 T) 10^{-4}$	$0,209 T - 53,076$	0,989	0,990
1,0	$(39,224 - 0,1194 T) 10^{-4}$	$0,240 T - 61,424$	0,958	0,978

В общем виде эти уравнения можно записать следующим образом:

$$L = \alpha - \beta T \text{ и } f_{r,\pm} = \beta_1 T - \alpha_1.$$

Вид зависимостей коэффициентов α и β уравнения $L=f(T)$ от концентрации растворов хлорида калия показан на рис. 3.6.

Величина коэффициентов α и β для различных концентраций растворов хлорида калия может быть рассчитана по степенным уравнениям (величина достоверности аппроксимации равна 0,995 и 0,994 соответственно): $\alpha = 0,0033m^{-1,6779}$ и $\beta = 0,00001m^{-1,674}$.

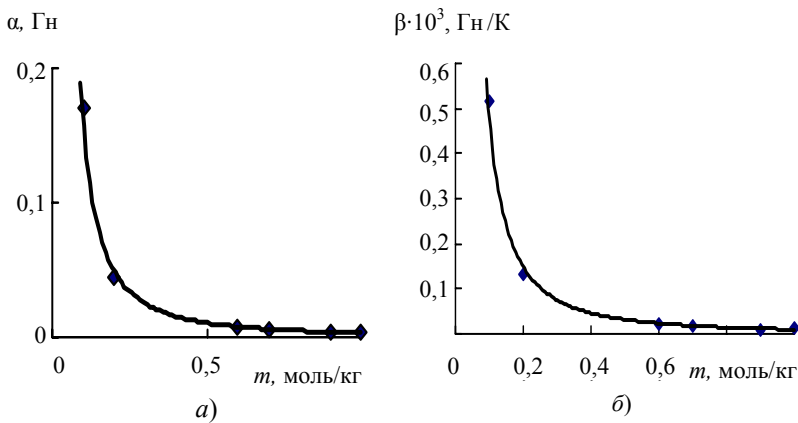


Рис. 3.6. Зависимости коэффициентов α (а) и β (б) уравнения $L=f(T)$ от концентрации растворов хлорида калия

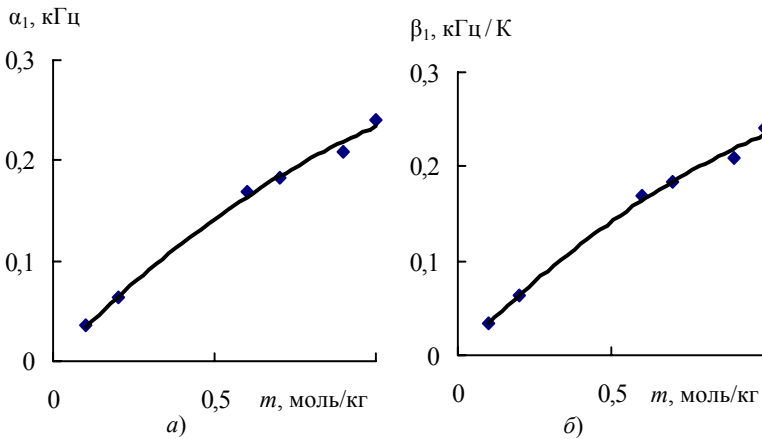


Рис. 3.7. Зависимости коэффициентов α_1 (а) и β_1 (б) уравнения $f_{r,\pm}=f(T)$ от концентрации растворов хлорида калия

Значения коэффициентов α_1 и β_1 уравнения зависимости $f_{r,\pm}=f(T)$ возрастают с увеличением температуры (рис. 3.7). Зависимости коэффициентов α_1 и β_1 от концентрации криволинейны и описываются следующими уравнениями (величины достоверности аппроксимации равны 0,994 и 0,995, соответственно):

$$\alpha_1 = 0,598 - 25,238 m^2 + 84,188 m \text{ и } \beta_1 = 0,0032 - 0,0918 m^2 + 0,3222 m.$$

Уменьшение индуктивности и увеличение средней резонансной частоты колебаний гидратированных ионов связано со снижением массы колеблющихся гидратированных ионов при увеличении концентрации раствора. Этот вывод соответствует представлениям о влиянии концентрации раствора на количество молекул воды, увлекаемых ионом при движении в двойном электрическом слое.

Таким образом, получены уравнения зависимостей реактивных составляющих импеданса кондуктометрической ячейки (емкости C_0 и индуктивности L), средней резонансной частоты колебаний гидратированных ионов $f_{r,\pm}$ и коэффициентов α , β , α_1 и β_1 соответствующих уравнений от концентрации растворов хлорида калия при различных температурах. Характер зависимостей указанных величин от концентрации объяснен тем, что средний ионный коэффициент активности и масса гидратированных ионов уменьшаются с ростом концентрации раствора. Величина емкости C_0 практически не зависит от концентрации, так как площадь поверхности электрода из-за низких значений коэффициентов линейного и объемного расширения платины существенно не изменяется.

3.2. ВЛИЯНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ И ТЕМПЕРАТУРЫ РАСТВОРОВ ХЛОРИДА НАТРИЯ НА ВЕЛИЧИНЫ СРЕДНЕЙ РЕЗОНАНСНОЙ ЧАСТОТЫ КОЛЕБАНИЙ ГИДРАТИРОВАННЫХ ИОНОВ И РЕАКТИВНЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ ИМПЕДАНСА

Полученные нами значения реактивных составляющих импеданса кондуктометрической ячейки с растворами хлорида натрия и средних резонансных частот колебаний гидратированных ионов натрия и хлора при различных концентрациях и температурах рассчитанные по результатам экспериментов (прил. 2) приведены в табл. 3.5.

Согласно данным табл. 3.5, реактивные составляющие импеданса кондуктометрической ячейки и средняя резонансная частота колебаний гидратированных ионов натрия и хлора по-разному изменяются с ростом концентрации. Графики зависи-

мостей средней резонансной частоты колебаний гидратированных ионов и индуктивности от концентрации показаны на рис. 3.8 и рис. 3.9.

3.5. Значения величин индуктивности, ёмкости и средней резонансной частоты колебаний гидратированных ионов в водных растворах NaCl

m , моль/кг	T , К	L , Гн	C_0 , мкФ	$f_{r,\pm}$, Гц
0,1	298	0,02532	0,65872	1232
	303	0,02043	0,64779	1383
	308	0,01782	0,69104	1434
	313	0,01465	0,67774	1597
0,2	298	0,00480	1,03907	2253
	303	0,0048	0,92533	2388
	308	0,00439	0,83654	2628
	313	0,00406	0,79974	2792
0,3	298	0,00398	0,79283	2832
	303	0,00306	0,74355	3337
	308	0,00266	0,69842	3693
	313	0,00245	0,66155	3952
0,4	298	0,00219	0,72474	3996
	303	0,00208	0,73943	4064
	308	0,00173	0,71124	4534
	313	0,00146	0,67654	5066

Продолжение табл. 3.5

m , моль/кг	T , К	L , Гн	C_0 , мкФ	$f_{r,\pm}$, Гц
0,5	298	0,00172	0,71398	4542
	303	0,00133	0,70289	5206
	308	0,00114	0,70038	5633
	313	0,00098	0,71429	6015
0,6	298	0,00123	0,68875	5460
	303	0,00102	0,6879	6006
	308	0,00087	0,69906	6458
	313	0,0007	0,67939	7303
0,7	298	0,00091	0,67367	6412
	303	0,00084	0,68809	6626
	308	0,00070	0,69955	7184
	313	0,00059	0,71587	7760
0,8	298	0,00079	0,67797	6887
	303	0,00065	0,68653	7543
	308	0,00052	0,69004	8428
	313	0,00041	0,71515	9348
0,9	298	0,00071	0,68648	7200
	303	0,00056	0,67349	8178
	308	0,00046	0,67627	9038
	313	0,0004	0,68199	9633
1,0	298	0,0006	0,6888	7894
	303	0,00045	0,68871	9057
	308	0,00039	0,69735	9619
	313	0,00031	0,70912	10664

Средняя резонансная частота колебаний гидратированных ионов хлора и натрия (рис. 3.8) увеличивается с ростом концентрации по степенному закону. Наблюдается также увеличение значений резонансной частоты с ростом температуры.

Уравнения зависимостей L и $f_{r,\pm}$ от концентрации при различных температурах и величины достоверности аппроксимации приведены в табл. 3.6. Зависимость $f_{r,\pm}$ от температуры и концентрации описывается уравнением $f_{r,\pm} = (176,5T - 44487) m^{0,8238}$.

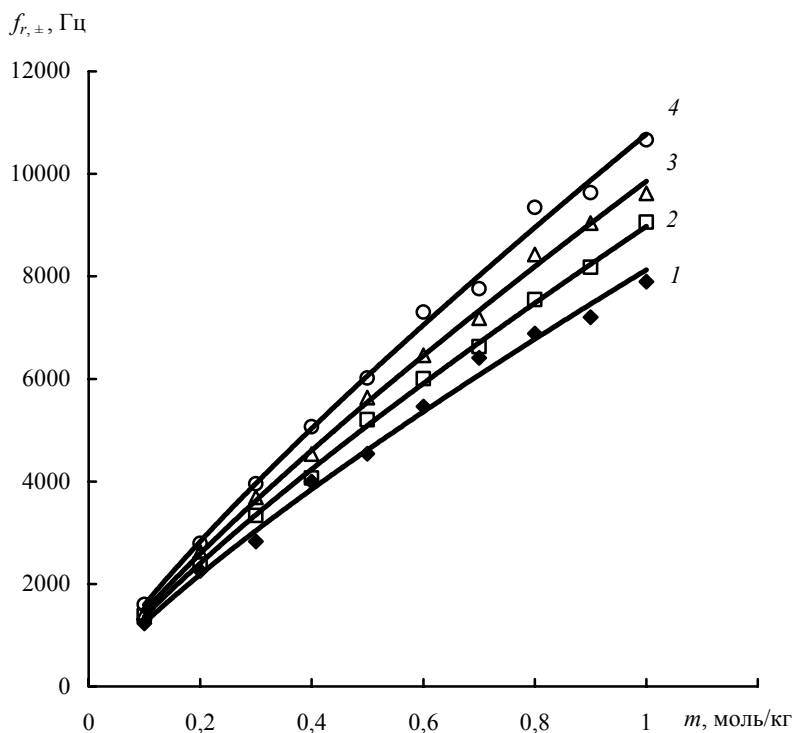


Рис. 3.8. Зависимости средней резонансной частоты колебаний гидратированных ионов хлора и натрия от концентрации при различных температурах:
1 – 298 К; 2 – 303 К; 3 – 308 К; 4 – 313 К

3.6. Уравнения зависимостей индуктивности и средней резонансной частоты колебаний гидратированных ионов натрия и хлора от концентрации раствора

$T, \text{ К}$	$L = f(m), \text{ Гн}$	$f_{r, \pm} = f(m), \text{ Гц}$	R_L^2	$R_{f_{r, \pm}}^2$
298	$L = 0,0006 m^{-1,5576}$	$f_{r, \pm} = 8126,8 m^{0,8162}$	0,983	0,996
303	$L = 0,0005 m^{-1,594}$	$f_{r, \pm} = 8975,2 m^{0,8185}$	0,994	0,999
308	$L = 0,0004 m^{-1,626}$	$f_{r, \pm} = 9855,5 m^{0,8298}$	0,997	0,999
313	$L = 0,0003 m^{-1,6568}$	$f_{r, \pm} = 10775 m^{0,8309}$	0,997	0,999

Такое поведение индуктивности и средней резонансной частоты колебаний гидратированных ионов может быть объяснено значительным уменьшением вязкости растворов электролитов и молекулярных масс гидратированных ионов хлора и натрия. Индуктивность с ростом концентрации и температуры уменьшается (рис. 3.9).

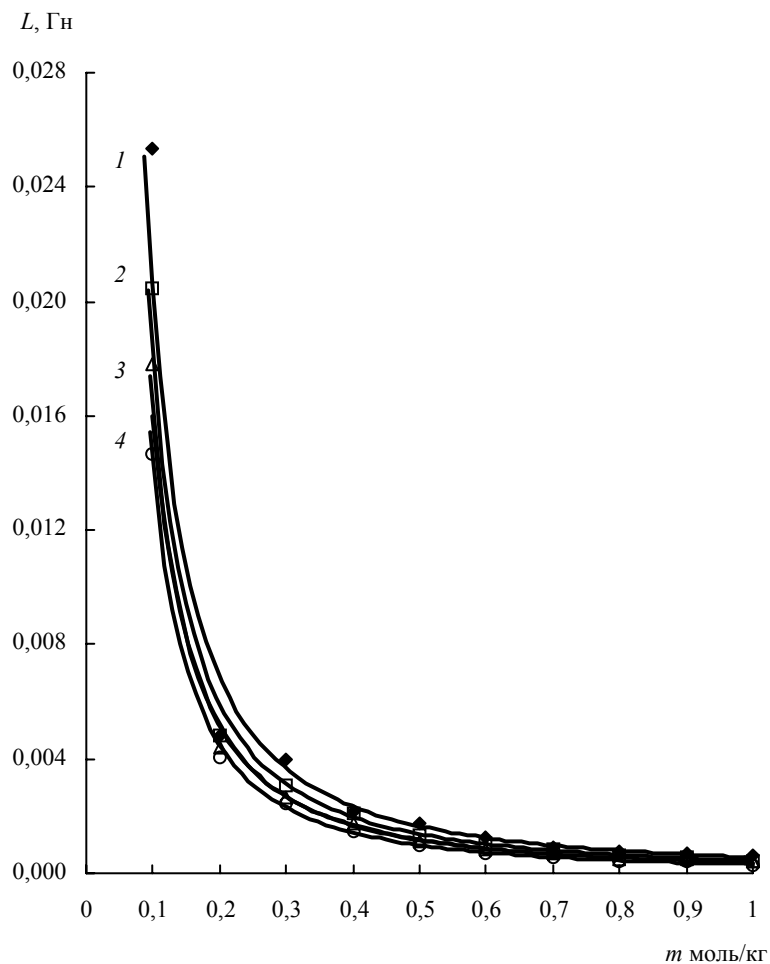


Рис. 3.9. Зависимости индуктивности от концентрации хлорида натрия при различных температурах:
1 – 298 К; 2 – 303 К; 3 – 308 К; 4 – 313 К

Графики зависимостей индуктивности, средней резонансной частоты колебаний гидратированных ионов хлорида натрия и емкости от температуры приведены на рис. 3.8 и 3.9.

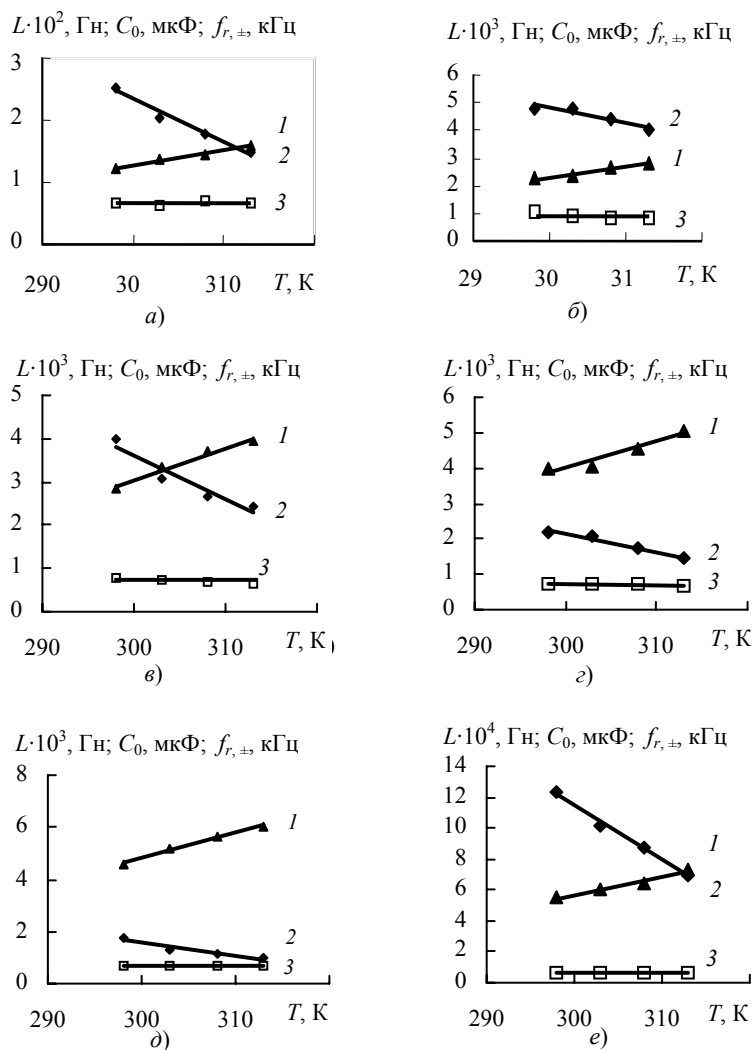


Рис. 3.10. Зависимости средней резонансной частоты колебаний (1) гидратированных ионов хлора и натрия, индуктивности (2) и емкости (3) от температуры в растворах с концентрацией (моль/кг): а – 0,1; б – 0,2; в – 0,3; г – 0,4; д – 0,5; е – 0,6

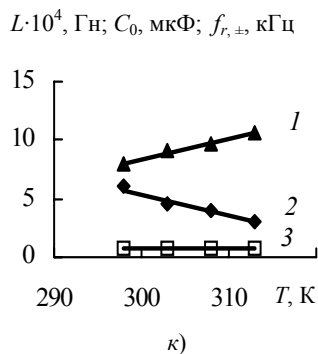
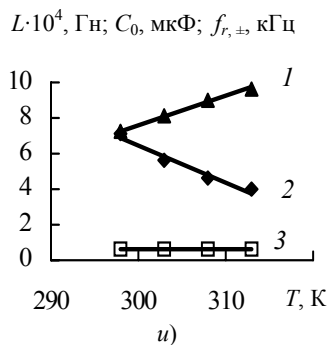
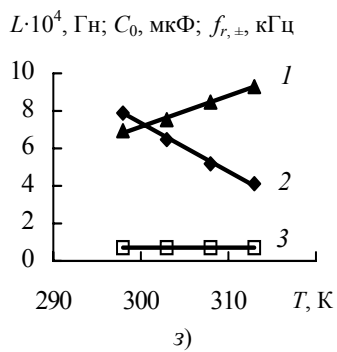
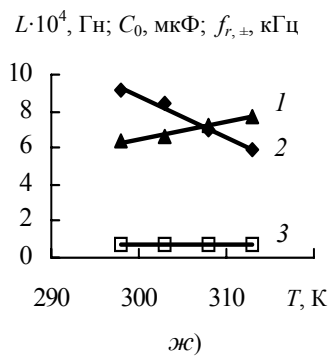


Рис. 3.10. Продолжение:
 ж – 0,7; з – 0,8; и – 0,9; к – 1,0

Показанные на рис. 3.10 зависимости имеют линейный вид. Средняя резонансная частота колебаний гидратированных ионов натрия и хлора (прямые $1a...1k$) увеличивается с ростом температуры, а индуктивная составляющая импеданса – уменьшается ($2a...2k$). Такое поведение индуктивной составляющей импеданса и средней резонансной частоты колебаний гидратированных ионов может быть объяснено значительным уменьшением вязкости растворов электролитов и увеличением подвижности ионов.

Обращает на себя внимание практически полное отсутствие влияния концентрации на значение емкости C_0 (прямые $3a...3k$, рис. 3.10). Средняя величина ее равна 0,7165 мкФ. Этот факт можно объяснить тем, что площадь поверхности электродов кондуктометрической ячейки из-за низких значений коэффициентов линейного и объемного расширения платины постоянна.

Уравнения зависимостей индуктивности и средней резонансной частоты колебаний гидратированных ионов от температуры для растворов хлорида натрия с различной концентрацией и величины достоверности аппроксимации R^2_L и $R^2_{f_{r,\pm}}$ приведены в табл. 3.7.

3.7. Уравнения зависимостей индуктивности и средней резонансной частоты колебаний гидратированных ионов натрия и хлора от температуры при различных концентрациях растворов хлорида натрия

m , моль/кг	$L = f(T)$, Гн	$f_{r,\pm} = f(T)$, кГц
0,1	$L = (23,108 - 0,0692 T) 10^{-2}$	$f_{r,\pm} = 0,0229 T - 5,591$
0,2	$L = (20,582 - 0,0526 T) 10^{-3}$	$f_{r,\pm} = 0,0371 T - 8,831$
0,3	$L = (33,526 - 0,0998 T) 10^{-3}$	$f_{r,\pm} = 0,0743 T - 19,25$
0,4	$L = (17,384 - 0,0508 T) 10^{-3}$	$f_{r,\pm} = 0,0736 T - 18,07$
0,5	$L = (16,018 - 0,0482 T) 10^{-3}$	$f_{r,\pm} = 0,0969 T - 24,26$
0,6	$L = (115,86 - 0,3480 T) 10^{-4}$	$f_{r,\pm} = 0,1196 T - 30,24$
0,7	$L = (74,81 - 0,2200 T) 10^{-4}$	$f_{r,\pm} = 0,0920 T - 21,123$
0,8	$L = (83,522 - 0,2540 T) 10^{-4}$	$f_{r,\pm} = 0,1654 T - 42,470$
0,9	$L = (68,258 - 0,2060 T) 10^{-4}$	$f_{r,\pm} = 0,1632 T - 41,340$
1,0	$L = (61,198 - 0,1860 T) 10^{-4}$	$f_{r,\pm} = 0,1774 T - 44,900$

В общем виде эти уравнения можно записать следующим образом:

$$L = \alpha - \beta T;$$

$$f_{r,\pm} = \beta_1 T - \alpha_1.$$

Величина коэффициентов α и β для различных концентраций растворов хлорида натрия может быть рассчитана по степенным уравнениям (величина достоверности аппроксимации равна 0,983 и 0,980, соответственно)

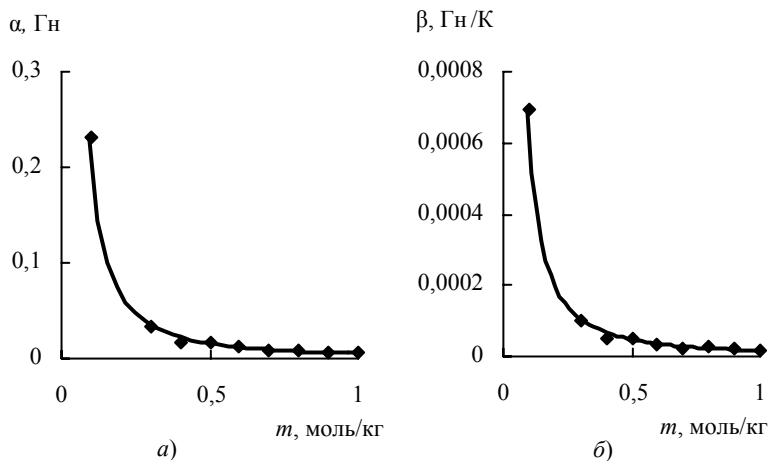
$$\alpha = 0,0052m^{-1,5832};$$

$$\beta = 0,00002m^{-1,5771}.$$

Вид зависимостей коэффициентов α и β уравнения $L = f(T)$ от концентрации растворов хлорида натрия показан на рис. 3.11.

Значения коэффициентов α_1 и β_1 уравнения зависимости $f_{r,\pm} = f(T)$ возрастают с увеличением температуры (рис. 3.12).

Зависимости коэффициентов α_1 и β_1 от концентрации криволинейны и описываются следующими уравнениями (вели-



чины достоверности аппроксимации равны 0,995 и 0,997, соответственно):

Рис. 3.11. Зависимости коэффициентов α и β (а и б, соответственно) уравнения $L = f(T)$ от концентрации растворов хлорида натрия

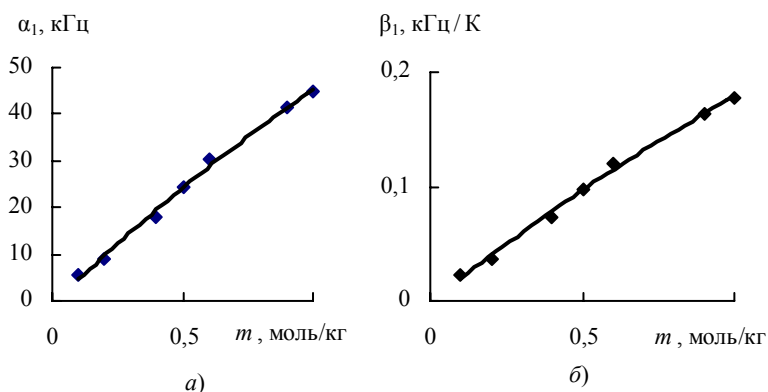


Рис. 3.12. Зависимости коэффициентов α_1 и β_1 уравнения $f_{r,\pm} = f(T)$ от концентрации растворов хлорида натрия (a и b , соответственно)

$$\alpha_1 = 0,6851 - 7,588 m^2 + 53,509 m \quad \text{и} \quad \beta_1 = 0,0012 - 0,0324 m^2 + 0,212 m.$$

Уменьшение индуктивности и увеличение средней резонансной частоты колебаний гидратированных ионов связано со снижением массы колеблющихся гидратированных ионов при увеличении концентрации раствора. Экспериментально определенные значения средней резонансной частоты колебаний гидратированных ионов и рассчитанные по уравнениям (1.9) и (1.10) близки (табл. 3.8). Лучшее соответствие этих величин наблюдается в случае использования уравнения (1.10).

Таким образом, получены уравнения зависимостей реактивных составляющих импеданса кондуктометрической ячейки (емкости C_0 и индуктивности L), средней резонансной частоты колебаний гидратиро-

3.8. Экспериментальные (a) и рассчитанные значения $f_{r,\pm}$ (b) и (c)

по уравнениям (1.9) и (1.10) и относительные отклонения расчетных величин от экспериментальных (b^*) и (c^*), соответственно

T, K	$m, \text{ моль/кг}$	$f_{r,\pm}, \text{ Гц}$			$\varepsilon, \%$	
		a	b	c	b^*	c^*
298	0,1	1232	1165	1173	5,438	4,789
	0,2	2253	2113	2119	6,214	5,948
	0,3	2832	2989	3011	-5,540	-6,320
	0,4	3996	3790	3832	5,155	4,104
	0,5	4542	4557	4631	-0,330	-1,960
	0,6	5460	5280	5380	3,297	1,465
	0,7	6412	5948	6087	7,236	5,069
	0,8	6887	6607	6784	4,066	1,496
	0,9	7200	7229	7454	-0,400	-3,530
	1,0	7894	7823	8095	0,899	-2,550
303	0,1	1383	1291	1299	6,652	6,074
	0,2	2388	2338	2340	2,094	2,010
	0,3	3337	3309	3329	0,839	0,240
	0,4	4064	4193	4232	-3,170	-4,130
	0,5	5206	5043	5119	3,131	1,671
	0,6	6006	5844	5946	2,697	0,999
	0,7	6626	6579	6724	0,709	-1,480
	0,8	7543	7310	7495	3,089	0,636
	0,9	8178	8002	8240	2,152	-0,760
	1,0	9057	8662	8950	4,361	1,181

Продолжение табл. 3.8

T, K	$m, \text{ моль/кг}$	$f_{r,\pm}, \text{ Гц}$			$\varepsilon, \%$	
		a	b	c	b^*	c^*
308	0,1	1434	1417	1426	1,185	0,558
	0,2	2628	2563	2561	2,473	2,549
	0,3	3693	3629	3645	1,733	1,300
	0,4	4534	4594	4630	-1,320	-2,120
	0,5	5633	5530	5604	1,829	0,515
	0,6	6458	6408	6508	0,774	-0,770
	0,7	7184	7210	7357	-0,360	-2,410
	0,8	8428	8014	8202	4,912	2,682
	0,9	9038	8777	9024	2,888	0,155
	1,0	9619	9506	9806	1,175	-1,940

313	0,1	1597	1536	1545	3,820	3,256
	0,2	2792	2774	2767	0,645	0,895
	0,3	3952	3929	3939	0,582	0,329
	0,4	5066	4970	5000	1,895	1,303
	0,5	6015	5986	6057	0,482	-0,7
	0,6	7303	6938	7033	4,998	3,697
	0,7	7760	7801	7947	-0,530	-2,410
	0,8	9348	8676	8863	7,189	5,188
	0,9	9633	9510	9761	1,277	-1,330
	1,0	10664	10308	10612	3,338	0,488

ванных ионов $f_{r,\pm}$ и коэффициентов α , β , α_1 и β_1 соответствующих уравнений от концентрации растворов хлорида натрия при различных температурах. Характер зависимостей указанных величин от концентрации определяется тем, что средний ионный коэффициент активности и масса гидратированных ионов уменьшаются с ростом концентрации раствора. Величина емкости C_0 практически не зависит от концентрации, так как площадь поверхности электрода из-за низких значений коэффициентов линейного и объёмного расширения платины существенно не изменяется.

4. ПРОГРАММНО-АНАЛИТИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ РАСЧЁТА СРЕДНИХ РЕЗОНАНСНЫХ ЧАСТОТ КОЛЕБАНИЙ ГИДРАТИРОВАННЫХ ИОНОВ

4.1. АНАЛИТИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС УРАВНЕНИЙ ДЛЯ РАСЧЁТА СРЕДНИХ РЕЗОНАНСНЫХ ЧАСТОТ КОЛЕБАНИЙ ГИДРАТИРОВАННЫХ ИОНОВ

Аналитический комплекс уравнений для расчёта средних резонансных частот колебаний гидратированных ионов составлен на основе уравнений (1.9) и (1.10). В связи с отсутствием в доступных справочниках значений кинематической вязкости для растворов солей мы в уравнении (1.10) заменили μ на η/ρ с сохранением значения коэффициента k уравнения (1.9). Уравнение (1.10) приобрело вид:

$$f_{r,\pm} = (\eta/\rho)^{-1} k [(F^2 \gamma_{\pm} m \lambda_{\sim,+}) / (\pi M_a M_k \lambda_{\sim,-})]^{0,5}, \quad (4.1)$$

где η – динамическая вязкость раствора электролита, мПа·с; ρ – плотность растворов электролитов, кг/дм³; F – 96484,56 Кл/моль; M_a , M_k – массы гидратированных анионов и катионов, кг·моль⁻¹; γ_{\pm} – средний коэффициент активности раствора электролита; m – моляльная концентрация раствора электролита, моль/кг; $\lambda_{\sim,+}$ – предельная эквивалентная подвижность K^+ или Na^+ ; $\lambda_{\sim,-}$ – предельная эквивалентная подвижность Cl^- ; $k = 0,03162278$; $\pi = 3,1415926$.

Массы гидратированных ионов зависят от величин обобщенных потенциалов ионов:

$$M_k = A_k + M_{H_2O} [V_k / (M_{H_2O} \gamma_{\pm} m (V_k + V_A))]^{0,5}, \quad (4.2)$$

$$M_A = A_A + M_{H_2O} [V_A / (M_{H_2O} \gamma_{\pm} m (V_k + V_A))]^{0,5}. \quad (4.3)$$

Для расчета масс гидратированных ионов анионов и катионов по уравнениям (4.2) и (4.3) были использованы следующие значения входящих в них величин, соответственно:

- A_k – атомные массы K^+ и Na^+ (0,039102 и 0,022991 кг/моль);
- A_A – атомная масса Cl^- (0,035453 кг/моль);
- V_k – обобщенный потенциал катионов K^+ или Na^+ (10,8 и 14,7 В);
- V_A – обобщенный потенциал аниона Cl^- (7,96 В);
- M_{H_2O} – молекулярная масса воды (0,018015 кг/моль).

Для расчёта входящих в уравнение (4.1) параметров используются формулы (4.2) и (4.3), а также аппроксимационные уравнения, полученные с использованием справочных данных [6, 7] для зависимостей $\lambda_{\sim,+}$, $\lambda_{\sim,-}$, γ_{\pm} , η и ρ от температуры для растворов хлоридов калия и натрия в интервале концентраций 0,1...4 м с шагом 0,1 (табл. 4.1 – 4.5).

4.1. Уравнения зависимости среднего коэффициента активности растворов хлорида калия и натрия от температуры

m , моль/кг	$\gamma_{\pm} = f(m_{KCl})$	$\gamma_{\pm} = f(m_{NaCl})$
0,1	$-1 \cdot 10^{-17} t^2 - 0,0003 t + 0,7779$	$-2 \cdot 10^{-6} t^2 - 0,0002 t + 0,7799$
0,2	$-2 \cdot 10^{-5} t^2 + 0,0011 t + 0,7030$	$-5 \cdot 10^{-6} t^2 + 0,0001 t + 0,7345$
0,3	$-2 \cdot 10^{-5} t^2 + 0,0009 t + 0,6780$	$-7 \cdot 10^{-6} t^2 + 0,0003 t + 0,7092$
0,4	$-2 \cdot 10^{-5} t^2 + 0,0011 t + 0,6510$	$-8 \cdot 10^{-6} t^2 + 0,0004 t + 0,6917$
0,5	$-4 \cdot 10^{-5} t^2 + 0,0024 t + 0,6153$	$-8 \cdot 10^{-6} t^2 + 0,0005 t + 0,6785$
0,6	$-3 \cdot 10^{-5} t^2 + 0,0019 t + 0,6097$	$-9 \cdot 10^{-6} t^2 + 0,0006 t + 0,6678$
0,7	$-4 \cdot 10^{-5} t^2 + 0,0026 t + 0,5873$	$-1 \cdot 10^{-5} t^2 + 0,0006 t + 0,6590$

0,8	$-3 \cdot 10^{-5} t^2 + 0,0018 t + 0,5908$	$-1 \cdot 10^{-5} t^2 + 0,0007 t + 0,6514$
0,9	$-4 \cdot 10^{-5} t^2 + 0,0025 t + 0,5721$	$-1 \cdot 10^{-5} t^2 + 0,0007 t + 0,6447$
1,0	$-1 \cdot 10^{-5} t^2 + 0,0006 t + 0,5955$	$-1 \cdot 10^{-5} t^2 + 0,0007 t + 0,6389$
1,1	$-8 \cdot 10^{-6} t^2 + 0,0005 t + 0,5913$	$-1 \cdot 10^{-5} t^2 + 0,0010 t + 0,6370$
1,2	$-9 \cdot 10^{-6} t^2 + 0,0006 t + 0,5858$	$-1 \cdot 10^{-5} t^2 + 0,0011 t + 0,6351$
1,3	$-1 \cdot 10^{-5} t^2 + 0,0008 t + 0,5807$	$-2 \cdot 10^{-5} t^2 + 0,0013 t + 0,6335$
1,4	$-1 \cdot 10^{-5} t^2 + 0,0009 t + 0,5758$	$-2 \cdot 10^{-5} t^2 + 0,0014 t + 0,6324$
1,5	$-1 \cdot 10^{-5} t^2 + 0,0010 t + 0,5712$	$-2 \cdot 10^{-5} t^2 + 0,0015 t + 0,6316$
1,6	$-2 \cdot 10^{-5} t^2 + 0,0011 t + 0,5668$	$-2 \cdot 10^{-5} t^2 + 0,0017 t + 0,6312$
1,7	$-2 \cdot 10^{-5} t^2 + 0,0012 t + 0,5627$	$-2 \cdot 10^{-5} t^2 + 0,0018 t + 0,6311$
1,8	$-2 \cdot 10^{-5} t^2 + 0,0013 t + 0,5589$	$-2 \cdot 10^{-5} t^2 + 0,0019 t + 0,6315$
1,9	$-2 \cdot 10^{-5} t^2 + 0,0014 t + 0,5554$	$-2 \cdot 10^{-5} t^2 + 0,0020 t + 0,6322$
2,0	$-2 \cdot 10^{-5} t^2 + 0,0015 t + 0,5522$	$-3 \cdot 10^{-5} t^2 + 0,0021 t + 0,6334$
2,1	$-2 \cdot 10^{-5} t^2 + 0,0016 t + 0,5492$	$-3 \cdot 10^{-5} t^2 + 0,0022 t + 0,6349$
2,2	$-2 \cdot 10^{-5} t^2 + 0,0017 t + 0,5465$	$-3 \cdot 10^{-5} t^2 + 0,0023 t + 0,6367$
2,3	$-2 \cdot 10^{-5} t^2 + 0,0018 t + 0,5441$	$-3 \cdot 10^{-5} t^2 + 0,0024 t + 0,6390$
2,4	$-3 \cdot 10^{-5} t^2 + 0,0018 t + 0,5419$	$-3 \cdot 10^{-5} t^2 + 0,0025 t + 0,6416$
2,5	$-3 \cdot 10^{-5} t^2 + 0,0019 t + 0,5400$	$-3 \cdot 10^{-5} t^2 + 0,0026 t + 0,6446$
2,6	$-3 \cdot 10^{-5} t^2 + 0,0019 t + 0,5384$	$-3 \cdot 10^{-5} t^2 + 0,0026 t + 0,6480$

Продолжение табл. 4.1

m , моль/кг	$\gamma_{\pm} = f(m_{\text{KCl}})$	$\gamma_{\pm} = f(m_{\text{NaCl}})$
2,7	$-3 \cdot 10^{-5} t^2 + 0,0020 t + 0,5371$	$-3 \cdot 10^{-5} t^2 + 0,0027 t + 0,6518$
2,8	$-3 \cdot 10^{-5} t^2 + 0,0020 t + 0,5360$	$-3 \cdot 10^{-5} t^2 + 0,0028 t + 0,6560$
2,9	$-3 \cdot 10^{-5} t^2 + 0,0021 t + 0,5352$	$-3 \cdot 10^{-5} t^2 + 0,0028 t + 0,6605$
3,0	$-3 \cdot 10^{-5} t^2 + 0,0021 t + 0,5347$	$-3 \cdot 10^{-5} t^2 + 0,0029 t + 0,6654$
3,1	$-3 \cdot 10^{-5} t^2 + 0,0021 t + 0,5345$	$-3 \cdot 10^{-5} t^2 + 0,0029 t + 0,6707$
3,2	$-3 \cdot 10^{-5} t^2 + 0,0021 t + 0,5345$	$-4 \cdot 10^{-5} t^2 + 0,0030 t + 0,6764$
3,3	$-3 \cdot 10^{-5} t^2 + 0,0022 t + 0,5348$	$-4 \cdot 10^{-5} t^2 + 0,0030 t + 0,6825$
3,4	$-3 \cdot 10^{-5} t^2 + 0,0022 t + 0,5354$	$-4 \cdot 10^{-5} t^2 + 0,0031 t + 0,6889$
3,5	$-3 \cdot 10^{-5} t^2 + 0,0022 t + 0,5362$	$-4 \cdot 10^{-5} t^2 + 0,0031 t + 0,6957$
3,6	$-3 \cdot 10^{-5} t^2 + 0,0022 t + 0,5374$	$-4 \cdot 10^{-5} t^2 + 0,0031 t + 0,7029$
3,7	$-3 \cdot 10^{-5} t^2 + 0,0021 t + 0,5388$	$-4 \cdot 10^{-5} t^2 + 0,0032 t + 0,7105$
3,8	$-3 \cdot 10^{-5} t^2 + 0,0021 t + 0,5405$	$-4 \cdot 10^{-5} t^2 + 0,0032 t + 0,7185$
3,9	$-3 \cdot 10^{-5} t^2 + 0,0021 t + 0,5424$	$-4 \cdot 10^{-5} t^2 + 0,0032 t + 0,7268$
4,0	$-3 \cdot 10^{-5} t^2 + 0,0021 t + 0,5446$	$-4 \cdot 10^{-5} t^2 + 0,0032 t + 0,7356$

4.2. Уравнения зависимости динамической вязкости растворов хлорида калия и натрия от температуры

m , моль/кг	η_{KCl} , мПа·с	η_{NaCl} , мПа·с
0,1	$0,0002 t^2 - 0,0331 t + 1,5692$	$0,0003 t^2 - 0,0342 t + 1,5936$
0,2	$0,0002 t^2 - 0,0328 t + 1,5632$	$0,0003 t^2 - 0,0342 t + 1,6015$
0,3	$0,0002 t^2 - 0,0324 t + 1,5553$	$0,0003 t^2 - 0,0343 t + 1,6100$
0,4	$0,0002 t^2 - 0,0322 t + 1,5511$	$0,0003 t^2 - 0,0343 t + 1,6192$
0,5	$0,0002 t^2 - 0,0317 t + 1,5428$	$0,0003 t^2 - 0,0344 t + 1,6289$
0,6	$0,0002 t^2 - 0,0314 t + 1,5368$	$0,0003 t^2 - 0,0345 t + 1,6392$
0,7	$0,0002 t^2 - 0,0311 t + 1,5314$	$0,0003 t^2 - 0,0346 t + 1,6501$
0,8	$0,0002 t^2 - 0,0308 t + 1,5253$	$0,0003 t^2 - 0,0347 t + 1,6616$
0,9	$0,0002 t^2 - 0,0304 t + 1,5192$	$0,0003 t^2 - 0,0349 t + 1,6737$
1,0	$0,0002 t^2 - 0,0301 t + 1,5138$	$0,0003 t^2 - 0,0351 t + 1,6864$

1,1	$0,0002 t^2 - 0,0303 t + 1,5116$	$0,0003 t^2 - 0,0352 t + 1,6997$
-----	----------------------------------	----------------------------------

Продолжение табл. 4.2

m , МОЛЬ/КГ	η_{KCl} , МПа·с	η_{NaCl} , МПа·с
1,2	$0,0002 t^2 - 0,0301 t + 1,5071$	$0,0003 t^2 - 0,0354 t + 1,7136$
1,3	$0,0002 t^2 - 0,0299 t + 1,5028$	$0,0003 t^2 - 0,0357 t + 1,7280$
1,4	$0,0002 t^2 - 0,0296 t + 1,4987$	$0,0003 t^2 - 0,0359 t + 1,7431$
1,5	$0,0002 t^2 - 0,0294 t + 1,4949$	$0,0003 t^2 - 0,0361 t + 1,7587$
1,6	$0,0002 t^2 - 0,0292 t + 1,4913$	$0,0003 t^2 - 0,0364 t + 1,7750$
1,7	$0,0002 t^2 - 0,0290 t + 1,4879$	$0,0003 t^2 - 0,0367 t + 1,7918$
1,8	$0,0002 t^2 - 0,0288 t + 1,4847$	$0,0003 t^2 - 0,0370 t + 1,8092$
1,9	$0,0002 t^2 - 0,0286 t + 1,4818$	$0,0003 t^2 - 0,0373 t + 1,8272$
2,0	$0,0002 t^2 - 0,0284 t + 1,4791$	$0,0003 t^2 - 0,0377 t + 1,8458$
2,1	$0,0002 t^2 - 0,0282 t + 1,4766$	$0,0003 t^2 - 0,0380 t + 1,8651$
2,2	$0,0002 t^2 - 0,0280 t + 1,4744$	$0,0003 t^2 - 0,0384 t + 1,8848$
2,3	$0,0002 t^2 - 0,0278 t + 1,4724$	$0,0003 t^2 - 0,0388 t + 1,9052$
2,4	$0,0002 t^2 - 0,0276 t + 1,4706$	$0,0003 t^2 - 0,0392 t + 1,9262$
2,5	$0,0002 t^2 - 0,0275 t + 1,4691$	$0,0003 t^2 - 0,0397 t + 1,9478$
2,6	$0,0002 t^2 - 0,0273 t + 1,4678$	$0,0003 t^2 - 0,0401 t + 1,9699$
2,7	$0,0002 t^2 - 0,0272 t + 1,4667$	$0,0003 t^2 - 0,0406 t + 1,9927$
2,8	$0,0002 t^2 - 0,0270 t + 1,4658$	$0,0003 t^2 - 0,0411 t + 2,0161$
2,9	$0,0002 t^2 - 0,0269 t + 1,4652$	$0,0003 t^2 - 0,0416 t + 2,0400$
3,0	$0,0002 t^2 - 0,0267 t + 1,4648$	$0,0003 t^2 - 0,0421 t + 2,0645$
3,1	$0,0002 t^2 - 0,0266 t + 1,4646$	$0,0003 t^2 - 0,0426 t + 2,0897$
3,2	$0,0002 t^2 - 0,0265 t + 1,4647$	$0,0003 t^2 - 0,0432 t + 2,1154$
3,3	$0,0002 t^2 - 0,0264 t + 1,4650$	$0,0003 t^2 - 0,0438 t + 2,1417$
3,4	$0,0002 t^2 - 0,0263 t + 1,4655$	$0,0003 t^2 - 0,0443 t + 2,1686$
3,5	$0,0002 t^2 - 0,0262 t + 1,4663$	$0,0003 t^2 - 0,0450 t + 2,1961$
3,6	$0,0002 t^2 - 0,0261 t + 1,4673$	$0,0003 t^2 - 0,0456 t + 2,2242$
3,7	$0,0002 t^2 - 0,0260 t + 1,4685$	$0,0003 t^2 - 0,0462 t + 2,2529$
3,8	$0,0002 t^2 - 0,0259 t + 1,4699$	$0,0004 t^2 - 0,0469 t + 2,2821$
3,9	$0,0002 t^2 - 0,0258 t + 1,4716$	$0,0004 t^2 - 0,0476 t + 2,3120$
4,0	$0,0002 t^2 - 0,0257 t + 1,4735$	$0,0004 t^2 - 0,0483 t + 2,3424$

4.3. Уравнения зависимости плотности водных растворов хлоридов калия и натрия от температуры

m , МОЛЬ/КГ	ρ_{KCl} , КГ/ДМ ³	ρ_{NaCl} , КГ/ДМ ³
0,1	$-6 \cdot 10^{-7} t^2 - 0,0003 t + 1,0096$	$1 \cdot 10^{-7} t^2 - 0,0003 t + 1,0073$
0,2	$-2 \cdot 10^{-6} t^2 - 0,0005 t + 1,0180$	$-7 \cdot 10^{-7} t^2 - 0,0003 t + 1,0106$
0,3	$-1 \cdot 10^{-6} t^2 - 0,0004 t + 1,0211$	$-2 \cdot 10^{-6} t^2 - 0,0002 t + 1,0139$
0,4	$-1 \cdot 10^{-7} t^2 - 0,0003 t + 1,0242$	$-2 \cdot 10^{-6} t^2 - 0,0002 t + 1,0173$
0,5	$-1 \cdot 10^{-6} t^2 - 0,0003 t + 1,0275$	$-3 \cdot 10^{-6} t^2 - 0,0001 t + 1,0206$
0,6	$-3 \cdot 10^{-6} t^2 - 0,0002 t + 1,0305$	$-4 \cdot 10^{-6} t^2 - 0,0001 t + 1,0240$
0,7	$-4 \cdot 10^{-6} t^2 - 0,0001 t + 1,0337$	$-4 \cdot 10^{-6} t^2 - 6 \cdot 10^{-5} t + 1,0274$
0,8	$-5 \cdot 10^{-6} t^2 - 5 \cdot 10^{-5} t + 1,0369$	$-5 \cdot 10^{-6} t^2 - 3 \cdot 10^{-5} t + 1,0307$
0,9	$-6 \cdot 10^{-6} t^2 + 4 \cdot 10^{-5} t + 1,0398$	$-5 \cdot 10^{-6} t^2 + 7 \cdot 10^{-6} t + 1,0341$
1,0	$-4 \cdot 10^{-6} t^2 - 0,0001 t + 1,0469$	$-6 \cdot 10^{-6} t^2 + 4 \cdot 10^{-5} t + 1,0375$
1,1	$-8 \cdot 10^{-6} t^2 + 0,0002 t + 1,0462$	$-6 \cdot 10^{-6} t^2 + 7 \cdot 10^{-5} t + 1,0410$
1,2	$-9 \cdot 10^{-6} t^2 + 0,0002 t + 1,0493$	$-7 \cdot 10^{-6} t^2 + 9 \cdot 10^{-5} t + 1,0444$
1,3	$-1 \cdot 10^{-5} t^2 + 0,0003 t + 1,0524$	$-7 \cdot 10^{-6} t^2 + 0,0001 t + 1,0478$

1,4	$-1 \cdot 10^{-5} t^2 + 0,0004 t + 1,0554$	$-8 \cdot 10^{-6} t^2 + 0,0001 t + 1,0513$
1,5	$-1 \cdot 10^{-5} t^2 + 0,0004 t + 1,0585$	$-8 \cdot 10^{-6} t^2 + 0,0002 t + 1,0547$
1,6	$-1 \cdot 10^{-5} t^2 + 0,0005 t + 1,0616$	$-8 \cdot 10^{-6} t^2 + 0,0002 t + 1,0582$
1,7	$-1 \cdot 10^{-5} t^2 + 0,0006 t + 1,0647$	$-9 \cdot 10^{-6} t^2 + 0,0002 t + 1,0617$
1,8	$-2 \cdot 10^{-5} t^2 + 0,0006 t + 1,0677$	$-9 \cdot 10^{-6} t^2 + 0,0002 t + 1,0651$
1,9	$-2 \cdot 10^{-5} t^2 + 0,0007 t + 1,0708$	$-9 \cdot 10^{-6} t^2 + 0,0002 t + 1,0686$
2,0	$-2 \cdot 10^{-5} t^2 + 0,0007 t + 1,0738$	$-9 \cdot 10^{-6} t^2 + 0,0002 t + 1,0721$
2,1	$-2 \cdot 10^{-5} t^2 + 0,0008 t + 1,0769$	$-9 \cdot 10^{-6} t^2 + 0,0002 t + 1,0756$
2,2	$-2 \cdot 10^{-5} t^2 + 0,0008 t + 1,0799$	$-9 \cdot 10^{-6} t^2 + 0,0002 t + 1,0792$
2,3	$-2 \cdot 10^{-5} t^2 + 0,0009 t + 1,0829$	$-9 \cdot 10^{-6} t^2 + 0,0002 t + 1,0827$
2,4	$-2 \cdot 10^{-5} t^2 + 0,0009 t + 1,0860$	$-9 \cdot 10^{-6} t^2 + 0,0002 t + 1,0863$
2,5	$-2 \cdot 10^{-5} t^2 + 0,001 t + 1,0890$	$-9 \cdot 10^{-6} t^2 + 0,0002 t + 1,0898$

Продолжение табл. 4.3

m , моль/кг	$\rho_{\text{КСИ}}$, кг/дм ³	ρ_{NaCl} , кг/дм ³
2,6	$-2 \cdot 10^{-5} t^2 + 0,001 t + 1,0920$	$-9 \cdot 10^{-6} t^2 + 0,0002 t + 1,0934$
2,7	$-2 \cdot 10^{-5} t^2 + 0,0011 t + 1,0950$	$-9 \cdot 10^{-6} t^2 + 0,0002 t + 1,0969$
2,8	$-2 \cdot 10^{-5} t^2 + 0,0011 t + 1,0980$	$-9 \cdot 10^{-6} t^2 + 0,0002 t + 1,1005$
2,9	$-2 \cdot 10^{-5} t^2 + 0,0012 t + 1,1009$	$-8 \cdot 10^{-6} t^2 + 0,0001 t + 1,1041$
3,0	$-2 \cdot 10^{-5} t^2 + 0,0012 t + 1,1039$	$-8 \cdot 10^{-6} t^2 + 0,0001 t + 1,1077$
3,1	$-3 \cdot 10^{-5} t^2 + 0,0012 t + 1,1069$	$-8 \cdot 10^{-6} t^2 + 9 \cdot 10^{-5} t + 1,1113$
3,2	$-3 \cdot 10^{-5} t^2 + 0,0013 t + 1,1099$	$-7 \cdot 10^{-6} t^2 + 7 \cdot 10^{-5} t + 1,1150$
3,3	$-3 \cdot 10^{-5} t^2 + 0,0013 t + 1,1128$	$-7 \cdot 10^{-6} t^2 + 4 \cdot 10^{-5} t + 1,1186$
3,4	$-3 \cdot 10^{-5} t^2 + 0,0013 t + 1,1158$	$-6 \cdot 10^{-6} t^2 + 7 \cdot 10^{-6} t + 1,1222$
3,5	$-3 \cdot 10^{-5} t^2 + 0,0014 t + 1,1187$	$-6 \cdot 10^{-6} t^2 - 3 \cdot 10^{-5} t + 1,1259$
3,6	$-3 \cdot 10^{-5} t^2 + 0,0014 t + 1,1216$	$-5 \cdot 10^{-6} t^2 - 6 \cdot 10^{-5} t + 1,1296$
3,7	$-3 \cdot 10^{-5} t^2 + 0,0014 t + 1,1246$	$-5 \cdot 10^{-6} t^2 - 0,0001 t + 1,1332$
3,8	$-3 \cdot 10^{-5} t^2 + 0,0015 t + 1,1275$	$-4 \cdot 10^{-6} t^2 - 0,0001 t + 1,1369$
3,9	$-3 \cdot 10^{-5} t^2 + 0,0015 t + 1,1304$	$-4 \cdot 10^{-6} t^2 - 0,0002 t + 1,1406$
4,0	$-3 \cdot 10^{-5} t^2 + 0,0015 t + 1,1333$	$-3 \cdot 10^{-6} t^2 - 0,0002 t + 1,1443$

4.4. Уравнения зависимости предельной эквивалентной электропроводности катионов в водных растворах ($\lambda_{\infty,+}$, Ом⁻¹·г-экв⁻¹·см²)

Ион	K ⁺	Na ⁺
$\lambda_{\infty,+}$	$0,0027 t^2 + 1,2802 t + 40,221$	$0,0024 t^2 + 0,9607 t + 25,402$

4.5. Уравнения зависимости предельной эквивалентной электропроводности анионов в водных растворах ($\lambda_{\infty,-}$, Ом⁻¹·г-экв⁻¹·см²)

Ион	Cl ⁻	CH ₃ COO ⁻
$\lambda_{\infty,-}$	$0,0036 t^2 + 1,3507 t + 40,628$	$0,0036 t^2 + 0,7409 t + 19,906$

4.2. ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ РАСЧЕТА СРЕДНИХ РЕЗОНАНСНЫХ ЧАСТОТ КОЛЕБАНИЙ ГИДРАТИРОВАННЫХ ИОНОВ

Полученные нами уравнения (табл. 4.1 – 4.5) были использованы при разработке программно-аналитического комплекса для расчета средних резонансных частот колебаний гидратированных ионов на базе уравнения (4.1). Программно-аналитический комплекс построен в среде программирования Visual C++ [12]. Он состоит из двух программ, блок-схемы которых приведены на рис. 4.1 – 4.2.

С помощью первой программы рассчитывают среднюю резонансную частоту колебаний гидратированных ионов водных растворов хлоридов калия и натрия с концентрациями $0,1 \dots 4 \text{ м}$ (шаг $0,1 \text{ м}$) в интервале температур $25 \dots 40 \text{ }^\circ\text{C}$ (шаг $1 \dots 5 \text{ }^\circ\text{C}$).

Для осуществления расчета необходимо загрузить компьютер и выбрать на рабочем столе «Программно-аналитический комплекс для расчёта средних резонансных частот колебаний гидратированных ионов в двойном электрическом слое для водных растворов хлоридов калия и натрия». Затем выбрать в меню «Вычислить» и в появившемся окне нажать кнопку «Резонансная частота – температура» (рис. 4.3).

Затем в окне ввода выбрать требуемое вещество (KCl или NaCl). После чего ввести в графы «Нижняя температура» и «Верхняя температура» желаемые значения, например 25 и 40, соответственно. В графу «Шаг температуры» ввести значение, например 5 (рис. 4.4).

Затем необходимо нажать кнопку «Вычислить», на экране появятся рассчитанные значения средних резонансных частот и масс гидратированных ионов при различных температурах для растворов с концентрациями в диапазоне $0,1 \dots 4 \text{ м}$ с шагом $0,1 \text{ м}$ (рис. 4.5).

Первая программа позволяет производить расчёты средних резонансных частот колебаний гидратированных ионов хлоридов калия и натрия с шагом концентрации только $0,1 \text{ м}$. Для практических целей необходимо рассчитывать значения средних резонансных частот колебаний гидратированных ионов с меньшим шагом концентрации.

С целью решения этой задачи нами использована первая программа для расчёта средних резонансных частот колебаний гидратированных ионов в широком диапазоне концентраций и температур и построения графиков зависимостей средних резонансных частот колебаний от концентрации при различных температурах (шаг $1 \text{ }^\circ\text{C}$).

Полученные с помощью программы Microsoft Excel аппроксимационные уравнения линий тренда (табл. 4.6 – 4.9) применены в программно-аналитическом комплексе для расчета средних резонансных частот колебаний гидратированных ионов в интервале концентраций $0,1 \dots 4 \text{ м}$ с шагом $0,01 \text{ м}$ (вторая программа).

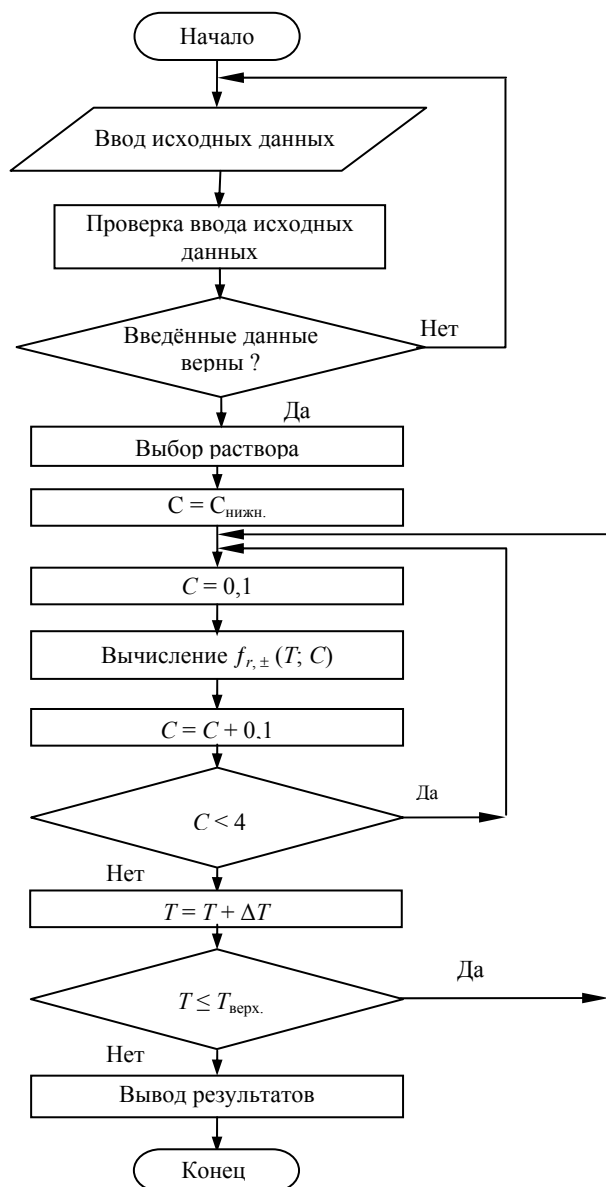


Рис. 4.1. Блок-схема первой программы

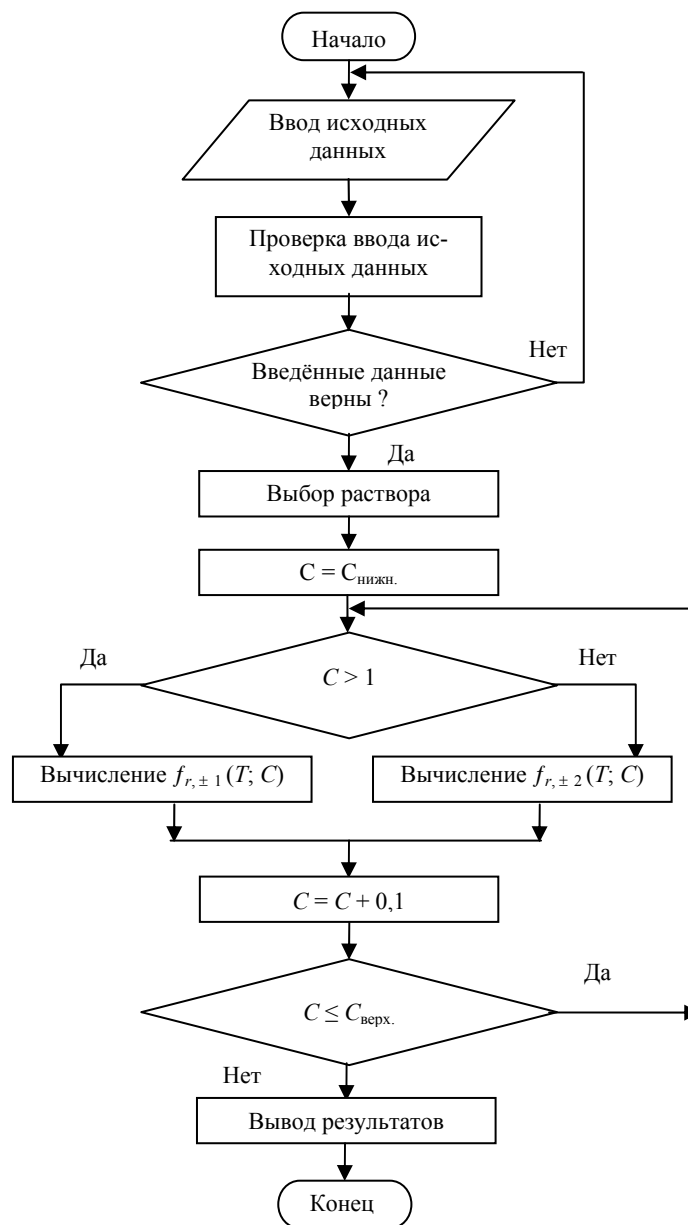


Рис. 4.2. Блок-схема второй программы

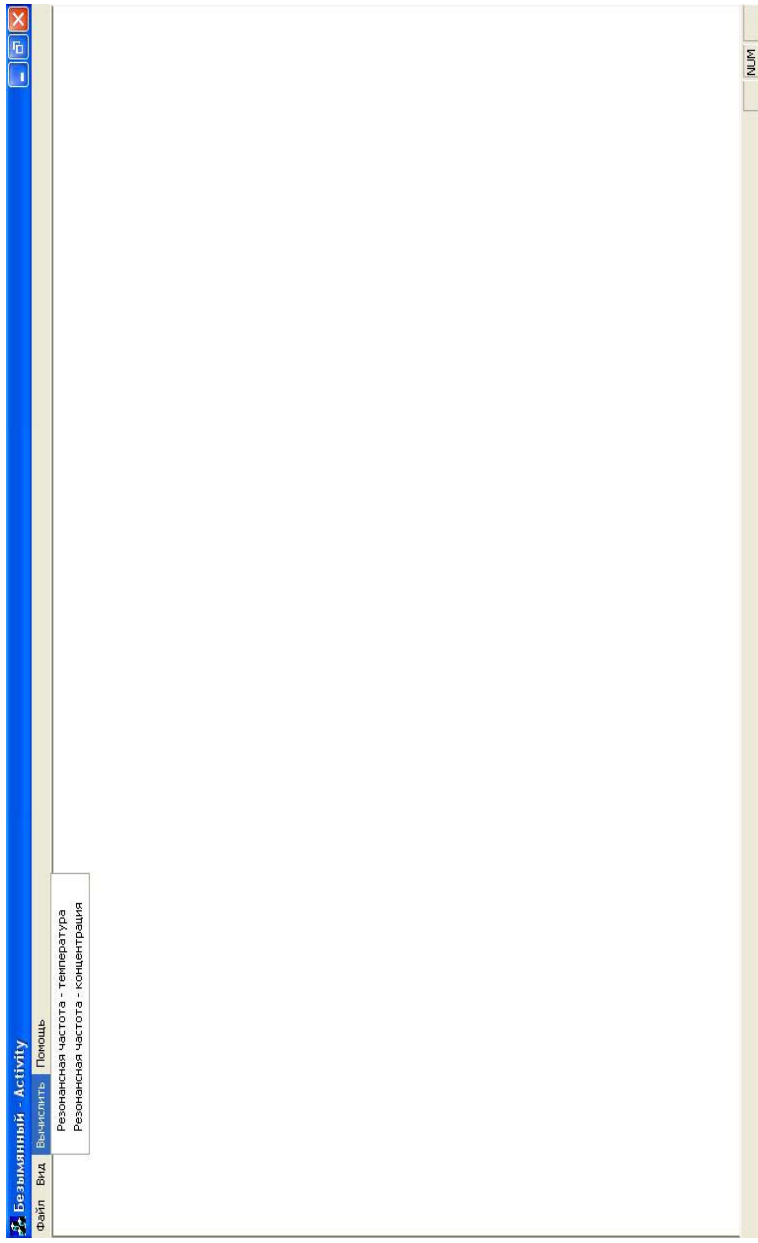


Рис. 4.3. Программно-аналитический комплекс для расчёта средних резонансных частот колебаний гидратированных ионов в двойном электрическом слое для водных растворов KCl и NaCl

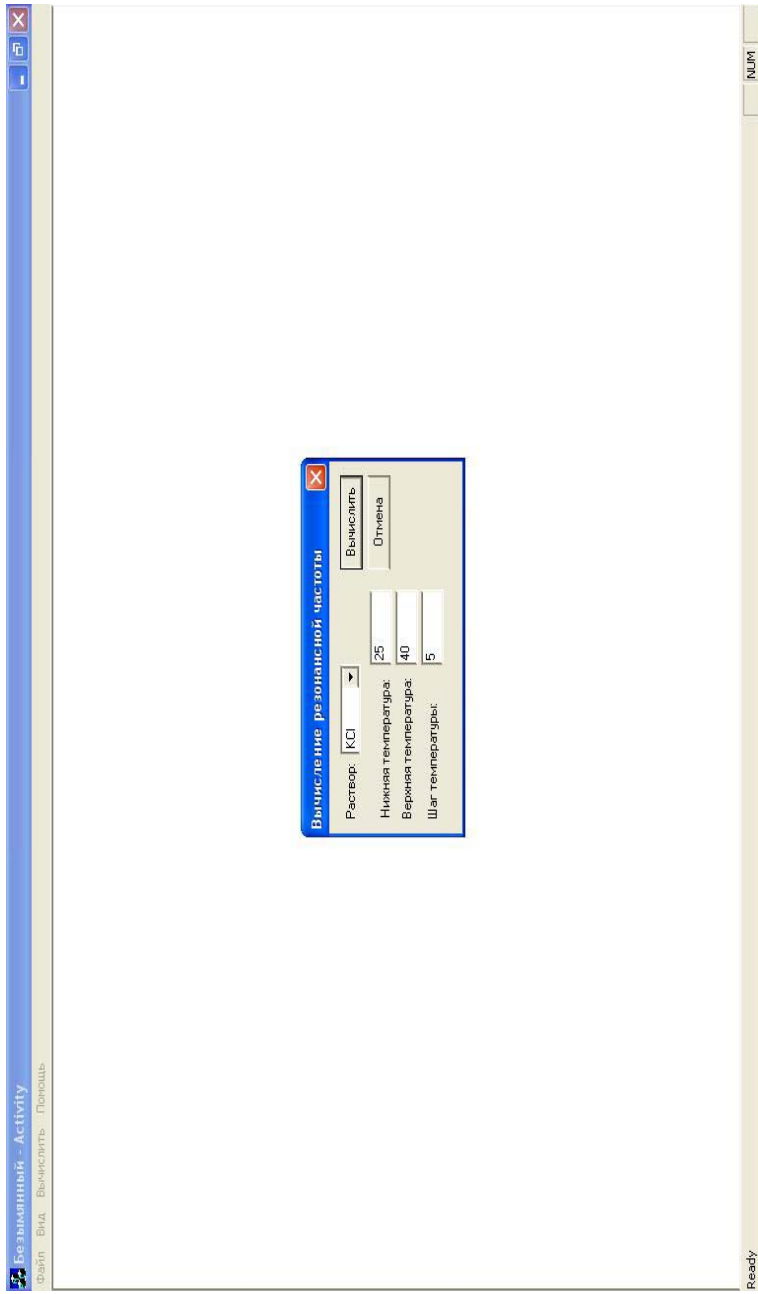


Рис. 4.4. Окно первой программы

Результаты расчетов (раствор KCl)					
С, моль/кг	Т, С	Мк, кг/моль	Ма, кг/моль	Fr, Гц	NUM
0.1	25	0.4060	0.3504	1437.680736	
0.2	25	0.3078	0.2662	2594.989161	
0.3	25	0.2633	0.2279	3644.915181	
0.4	25	0.2364	0.2048	4627.238773	
0.5	25	0.2177	0.1888	5537.540877	
0.6	25	0.2036	0.1767	6438.913038	
0.7	25	0.1928	0.1674	7298.513899	
0.8	25	0.1840	0.1599	8120.801016	
0.9	25	0.1766	0.1535	8902.933814	
1.0	25	0.1701	0.1479	9737.897445	
1.1	25	0.1646	0.1432	10636.143844	
1.2	25	0.1596	0.1389	11438.926717	
1.3	25	0.1549	0.1349	12302.216225	
1.4	25	0.1510	0.1315	13092.666425	
1.5	25	0.1474	0.1284	13877.988619	
1.6	25	0.1447	0.1261	14551.465743	
1.7	25	0.1416	0.1235	15347.091745	
1.8	25	0.1389	0.1211	16006.194045	
1.9	25	0.1363	0.1189	16786.756521	
2.0	25	0.1339	0.1168	17522.569500	
2.1	25	0.1316	0.1149	18294.555103	
2.2	25	0.1295	0.1131	19017.780240	
2.3	25	0.1275	0.1114	19782.469833	
2.4	25	0.1253	0.1103	20237.183672	
2.5	25	0.1245	0.1088	21044.695676	
2.6	25	0.1230	0.1075	21668.042856	
2.7	25	0.1213	0.1060	22479.946925	
2.8	25	0.1199	0.1048	23094.183243	
2.9	25	0.1184	0.1035	23904.504067	
3.0	25	0.1171	0.1024	24512.504599	
3.1	25	0.1158	0.1013	25045.217292	
3.2	25	0.1146	0.1003	25765.728777	
3.3	25	0.1133	0.0991	26524.289329	
3.4	25	0.1121	0.0982	27192.637606	
3.5	25	0.1110	0.0972	27914.666950	

Рис. 4.5. Результаты расчёта резонансной частоты по первой программе

Вторая программа отличается от первой тем, что она позволяет рассчитывать средние резонансные частоты колебаний гидратированных ионов при концентрациях недоступных для первой программы.

С помощью второй программы возможно рассчитать резонансную частоту колебаний гидратированных ионов при различных концентрациях растворов хлоридов калия и натрия в интервале 0,1...4,0 *m* с шагом 0,01 *m* при заданной температуре от 25...40 °C с шагом 1 °C.

4.6. Аппроксимационные уравнения для 0,1...1 *m* водных растворов KCl

<i>t</i> , °C	$f_{r,\pm}$, Гц
25	$f_{r\pm} = -2045,3 m^2 + 11350 m + 379,11$
26	$f_{r\pm} = -2148,5 m^2 + 11664 m + 386,66$
27	$f_{r\pm} = -2255,9 m^2 + 11986 m + 394,96$
28	$f_{r\pm} = -2367,7 m^2 + 12317 m + 404,06$
29	$f_{r\pm} = -2484,1 m^2 + 12656 m + 414,01$
30	$f_{r\pm} = -2605,4 m^2 + 13004 m + 424,88$
31	$f_{r\pm} = -2731,7 m^2 + 13361 m + 436,75$
32	$f_{r\pm} = -2863,4 m^2 + 13727 m + 449,67$
33	$f_{r\pm} = -3000,7 m^2 + 14102 m + 463,73$
34	$f_{r\pm} = -3143,8 m^2 + 14486 m + 479,01$
35	$f_{r\pm} = -3293,0 m^2 + 14879 m + 495,6$
36	$f_{r\pm} = -3448,6 m^2 + 15281 m + 513,6$
37	$f_{r\pm} = -3610,8 m^2 + 15693 m + 533,12$
38	$f_{r\pm} = -3779,9 m^2 + 16114 m + 554,25$
39	$f_{r\pm} = -3956,1 m^2 + 16543 m + 577,12$
40	$f_{r\pm} = -4139,6 m^2 + 16982 m + 601,86$

4.7. Аппроксимационные уравнения для 1,1...4 *m* водных растворов KCl

<i>t</i> , °C	$f_{r,\pm}$, Гц
25	$f_{r\pm} = -218,5 m^2 + 8136,5 m + 2083,1$
26	$f_{r\pm} = -233,81 m^2 + 8308,7 m + 2162,7$
27	$f_{r\pm} = -249,54 m^2 + 8480,6 m + 2250$
28	$f_{r\pm} = -265,68 m^2 + 8651,6 m + 2345,4$
29	$f_{r\pm} = -282,19 m^2 + 8821,3 m + 2449,5$
30	$f_{r\pm} = -299,04 m^2 + 8989,2 m + 2562,8$
31	$f_{r\pm} = -316,18 m^2 + 9154,9 m + 2686,1$
32	$f_{r\pm} = -333,57 m^2 + 9317,7 m + 2819,8$
33	$f_{r\pm} = -351,16 m^2 + 9477,0 m + 2964,5$
34	$f_{r\pm} = -368,88 m^2 + 9632,2 m + 3121,1$
35	$f_{r\pm} = -386,66 m^2 + 9782,6 m + 3290$

Продолжение табл. 4.7

<i>t</i> , °C	$f_{r,\pm}$, Гц
36	$f_{r\pm} = -404,43 m^2 + 9927,4 m + 3472$
37	$f_{r\pm} = -422,11 m^2 + 10066 m + 3667,6$
38	$f_{r\pm} = -439,59 m^2 + 10197 m + 3877,7$
39	$f_{r\pm} = -456,79 m^2 + 10320 m + 4102,8$
40	$f_{r\pm} = -473,59 m^2 + 10435 m + 4343,5$

4.8. Аппроксимационные уравнения для 0,1...4 *m* водных растворов NaCl

<i>t</i> , °C	$f_{r,\pm}$, Гц
25	$f_{r\pm} = -1834,6 m^2 + 9656,3 m + 251,93$
26	$f_{r\pm} = -1869,3 m^2 + 9853,6 m + 257,95$
27	$f_{r\pm} = -1903,8 m^2 + 10052 m + 264,1$
28	$f_{r\pm} = -1937,9 m^2 + 10250 m + 270,38$
29	$f_{r\pm} = -1971,6 m^2 + 10449 m + 276,78$
30	$f_{r\pm} = -2004,7 m^2 + 10647 m + 283,31$
31	$f_{r\pm} = -2037,1 m^2 + 10845 m + 289,94$
32	$f_{r\pm} = -2068,7 m^2 + 11041 m + 296,66$
33	$f_{r\pm} = -2099,2 m^2 + 11235 m + 303,48$
34	$f_{r\pm} = -2128,7 m^2 + 11428 m + 310,38$
35	$f_{r\pm} = -2156,9 m^2 + 11617 m + 317,33$
36	$f_{r\pm} = -2183,6 m^2 + 11803 m + 324,34$
37	$f_{r\pm} = -2208,7 m^2 + 11985 m + 331,38$
38	$f_{r\pm} = -2232,1 m^2 + 12162 m + 338,43$
39	$f_{r\pm} = -2253,6 m^2 + 12334 m + 345,47$

Для запуска второй программы после загрузки компьютера следует в появившемся окне выбрать «Резонансная частота – концентрация» (рис. 4.3).

Затем в окне ввода данных «Вычисление резонансной частоты» (рис. 4.6) указать интересующее исследователя вещество (КСI или NaCl) и ввести в графу «Нижний предел концентрации» необходимое значение, например 0,1. В графе «Верхний предел концентрации» задать необходимое значение, например 4, а в графу «Температура» ввести требуемое значение температуры, например 25.

После этого нажать кнопку «Вычислить». На экране появятся рассчитанные значения средних резонансных частот колебаний гидратированных ионов хлорида калия для 0,1...4 *m* растворов с шагом 0,01 *m* при температуре 25 °С.

На рис. 4.7 показан фрагмент значений средних резонансных частот колебаний гидратированных ионов хлорида калия в диапазоне концентраций растворов 1,0...1,3 *m* с шагом 0,01 *m* при 25 °С.

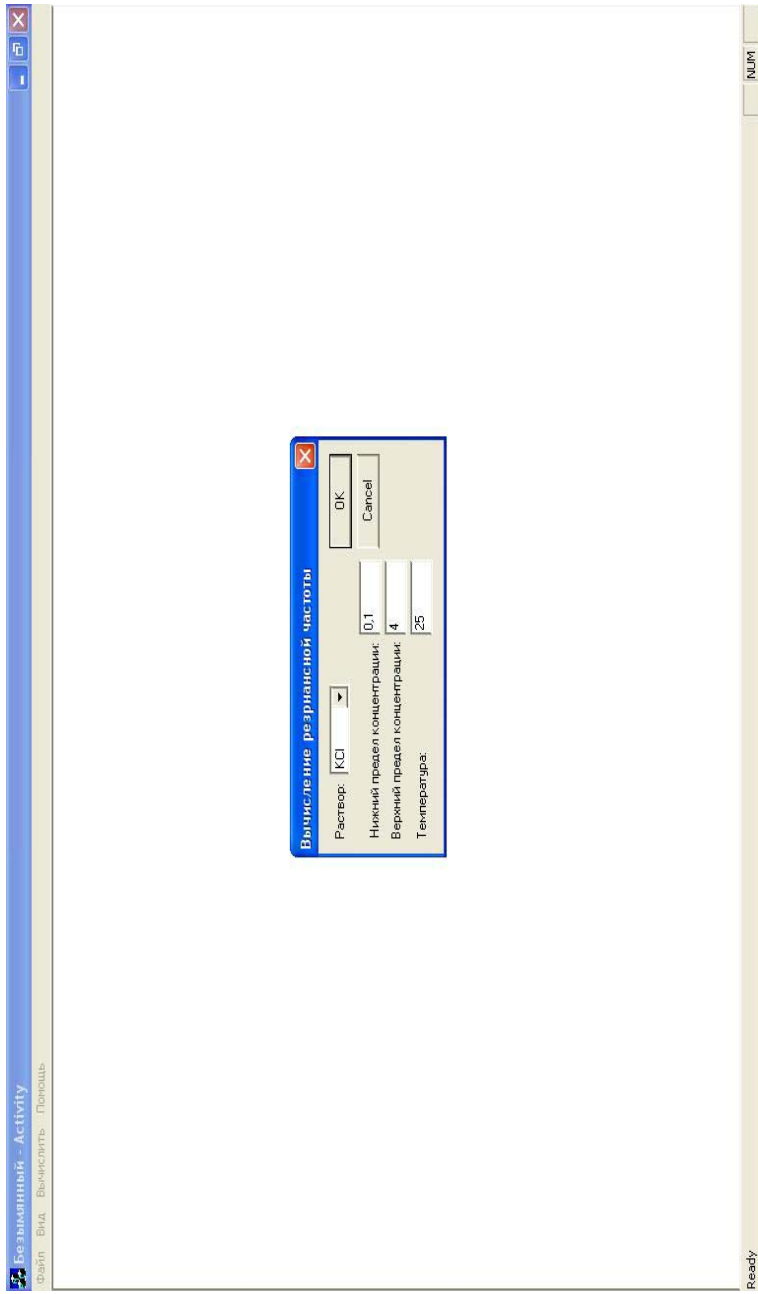


Рис. 4.6. Окно второй программы

Безымянный - Activu

Файл Вид Выделить Помощь

Результаты расчетов (раствор KCl)
Температура 25 градусов

C, моль/кг	Вг, г/л
1.00	9683.810
1.01	10078.073
1.02	10155.003
1.03	10231.888
1.04	10308.730
1.05	10385.528
1.06	10462.283
1.07	10538.994
1.08	10615.661
1.09	10692.285
1.10	10768.864
1.11	10845.400
1.12	10921.893
1.13	10998.341
1.14	11074.746
1.15	11151.108
1.16	11227.425
1.17	11303.699
1.18	11379.929
1.19	11456.116
1.20	11532.259
1.21	11608.358
1.22	11684.413
1.23	11760.425
1.24	11836.393
1.25	11912.317
1.26	11988.198
1.27	12064.034
1.28	12139.828
1.29	12215.577
1.30	12291.283

Ready

САР NUM

Рис. 4.7. Результаты расчёта резонансной частоты по второй программе

4.9. Аппроксимационные уравнения для 1,1...4,0 м водных растворов NaCl

$t, ^\circ\text{C}$	$f_{r,\pm}, \text{Гц}$
25	$f_{r,\pm} = -165,21 m^2 + 6733,5 m + 1661,7$
26	$f_{r,\pm} = -153,63 m^2 + 6851,4 m + 1704,1$
27	$f_{r,\pm} = -140,04 m^2 + 6965,5 m + 1749,8$
28	$f_{r,\pm} = -124,27 m^2 + 7075,1 m + 1799$
29	$f_{r,\pm} = -106,13 m^2 + 7179,5 m + 1851,9$
30	$f_{r,\pm} = -85,394 m^2 + 7277,8 m + 1909$
31	$f_{r,\pm} = -61,859 m^2 + 7369,3 m + 1970,5$
32	$f_{r,\pm} = -35,292 m^2 + 7452,9 m + 2036,9$
33	$f_{r,\pm} = -5,4489 m^2 + 7527,8 m + 2108,6$
34	$f_{r,\pm} = 27,923 m^2 + 7592,8 m + 2186,2$
35	$f_{r,\pm} = 65,09 m^2 + 7646,9 m + 2270$
36	$f_{r,\pm} = 106,33 m^2 + 7688,7 m + 2360,6$
37	$f_{r,\pm} = 151,92 m^2 + 7717,2 m + 2458,8$
38	$f_{r,\pm} = 202,15 m^2 + 7730,9 m + 2565$
39	$f_{r,\pm} = 257,33 m^2 + 7728,4 m + 2680$
40	$f_{r,\pm} = 317,75 m^2 + 7708,4 m + 2804,5$

Таким образом, разработанный программно-аналитический комплекс позволяет рассчитывать резонансные частоты колебаний гидратированных ионов для водных растворов хлоридов калия и натрия в интервале концентраций 0,1...4 м и температур 25...40 °С с заданным пользователем шагом концентраций и температур.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе физической модели, происходящих в двойном электрическом слое явлений в отсутствие фарадеевских процессов, и математической модели, позволяющей рассчитывать резонансные частоты колебаний гидратированных ионов, разработан метод кондуктометрического определения активного и реактивного сопротивлений импеданса, а также средних резонансных частот колебаний гидратированных ионов.

Установлено, что в традиционных кондуктометрических ячейках наблюдается сильное взаимное влияние электродов. Вид полученных зависимостей криволинеен, поэтому нахождение резонансной частоты колебаний гидратированных ионов графическим методом затруднен.

Обоснован выбор конструкции кондуктометрической ячейки для раздельного определения активной, ёмкостной и индуктивной составляющих импеданса.

Особенностью рекомендованной для измерений ячейки является наличие трубки с внутренним диаметром (1...2 мм), впаянной между вертикальными коленами U-образной ячейки.

Показано, что все составляющие импеданса можно определить лишь при использовании такой ячейки. Отклонение расчётных величин средних резонансных частот колебаний гидратированных ионов от экспериментальных значений не превышает 7 %.

Результаты измерений $f_{r,\pm}$ растворов 1, 1-валентных электролитов хорошо совпадают с теоретически рассчитанными величинами в диапазоне температур 298...313 К и концентраций 0,1...1,1 м (расхождение не превышает 10 %).

Подтверждена выдвинутая нами гипотеза: в двойном электрическом слое происходит взаимосвязанное колебание гидратированных катионов и анионов с общей массой, равной среднегеометрической величине.

Показано, что физическая и математическая модели адекватно описывают явления, происходящие в двойном электрическом слое в отсутствие стадии разряда-ионизации.

При выполнении последующих исследований эти представления и результаты измерений предполагается использовать для разработки метода анализа растворов электролитов на содержание хлоридов, сульфатов и ацетатов различных металлов, а также других солей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Латышенко, К.П. Состояние и перспективы развития контактной низкочастотной кондуктометрии / К.П. Латышенко // Вестник Тамб. гос. техн. ун-та. – 2006. – Т. 1, № 1 А. – С. 42 – 45
2. Килимник, А.Б. Колебательные процессы в двойном электрическом слое при наложении переменного тока / А.Б. Килимник // Вестник Тамб. гос. ун-та. Сер. Естеств. и техн. науки. – 2006. – Т. 11, вып. 4. – С. 586 – 587.
3. Интенсификация электрохимических процессов на основе несимметричного переменного тока / А.И. Диденко, В.А. Лебедев, С.В. Образцов [и др.] // Интенсификация электрохимических процессов / под ред. Томилова А.П. – М.: Наука, 1988. – С. 192 – 193.

4. Дамаскин, Б.Б. Основы теоретической электрохимии / Б.Б. Дамаскин, О.А. Петрий. – М. : Высшая школа, 1978. – 239 с.
5. Фролов, В.В. Химия / В.В. Фролов. – М. : Высшая школа, 1986. – 543 с.
6. Справочник химика / под ред. Б.П. Никольского. – Л. : Химия, 1964. – Т. 3. – 1008 с.
7. Свойства электролитов : справочник / под ред. И.Н. Максимовой. – М. : Metallurgy, 1987. – 128 с.
8. Килимник, А.Б. Кондуктометрическая ячейка для определения реактивных составляющих импеданса / А.Б. Килимник, В.В. Ярмоленко // Вестник Тамб. гос. техн. ун-та. – 2007. – Т. 13, № 1А. – С. 51 – 56.
9. Килимник, А.Б. Влияние площади поверхности электродов на точность определения реактивных составляющих импеданса / А.Б. Килимник, В.В. Ярмоленко // Вестник Тамб. гос. техн. ун-та. – 2007. – Т. 13, № 2А. – С. 467 – 473.
10. Ярмоленко, В.В. Влияние температуры на реактивные составляющие импеданса кондуктометрической ячейки / В.В. Ярмоленко // Вестник Тамб. гос. техн. ун-та. – 2007. – Т. 13, № 4А. – С. 908 – 912.
11. Килимник, А.Б. Влияние концентрации хлорида калия на реактивные составляющие импеданса кондуктометрической ячейки / А.Б. Килимник, В.В. Ярмоленко // Вестник Тамб. гос. техн. ун-та. – 2008. – Т. 14, № 1. – С. 111 – 117.
12. Ярмоленко, В.В. Разработка программно-аналитического комплекса для расчета средней резонансной частоты колебаний гидратированных ионов в растворах неорганических / В.В. Ярмоленко, А.Б. Килимник // Всероссийская школа-семинар «Инновационный менеджмент в сфере высоких технологий» / Тамб. гос. техн. ун-т. – 2008. – С. 260 – 261.

ДАННЫЕ ДЛЯ РАСТВОРОВ KCl

**П.1.1. Результаты измерения активного сопротивления и ёмкости
(0,1 м раствор KCl, T = 298 К)**

f , Гц	R_i , Ом	C_i , мкФ	f^2 , кГц ²	$1/C$, мкФ ⁻¹
798	9967	0,51553	0,637123	1,93975132
1197	9947	0,38725	1,432809	2,58231117
1598	9936	0,29862	2,553604	3,34873753
1998	9926	0,22948	3,992004	4,35767823
2397	9918	0,17914	5,745609	5,58222619
2797	9914	0,14253	7,823209	7,01606679
3198	9907	0,11512	10,227204	8,68658791

**П.1.2. Результаты измерения активного сопротивления и ёмкости
(0,1 м раствор KCl, T = 303 К)**

f , Гц	R_i , Ом	C_i , мкФ	f^2 , кГц ²	$1/C$, мкФ ⁻¹
798	9182	0,537	0,637123	1,86219739
1197	9182	0,417	1,432809	2,39808153
1597	9173	0,324	2,550409	3,08641975
1998	9160	0,253	3,992004	3,95256917
2398	9153	0,200	5,750404	5,00000000
2798	9141	0,161	7,828804	6,21118012
3198	9148	0,131	10,227204	7,63358779

**П.1.3. Результаты измерения активного сопротивления и ёмкости
(0,1 м раствор KCl, T = 308 К)**

f , Гц	R_i , Ом	C_i , мкФ	f^2 , кГц ²	$1/C$, мкФ ⁻¹
798	8465	0,544	0,636325	1,838235294
1196	8463	0,434	1,430416	2,304147465
1598	8453	0,345	2,553604	2,898550725
1997	8447	0,276	3,988009	3,623188406
2398	8436	0,222	5,750404	4,504504505
2798	8430	0,179	7,828804	5,586592179
3198	8430	0,148	10,227204	6,756756757

**П.1.4. Результаты измерения активного сопротивления и ёмкости
(0,1 м раствор KCl, T = 313 К)**

f , Гц	R_i , Ом	C_i , мкФ	f^2 , кГц ²	$1/C$, мкФ ⁻¹
800	7430	0,560	0,64	1,785714286
1200	7424	0,463	1,44	2,159827214
1600	7390	0,383	2,56	2,610966057
2000	7397	0,318	4,00	3,144654088
2400	7368	0,265	5,76	3,773584906
2800	7368	0,215	7,84	4,651162791
3200	7361	0,180	10,24	5,555555556

**П.1.5. Результаты измерения активного сопротивления и ёмкости
(0,2 м раствор KCl, T = 298 К)**

f , Гц	R_i , Ом	C_i , мкФ	f^2 , кГц ²	$1/C$, мкФ ⁻¹
798	5180	0,65100	0,636325	1,536098310
1198	5176	0,58400	1,435204	1,712328767
1598	5171	0,51800	2,553604	1,930501931
1998	5169	0,45200	3,992004	2,212389381
2397	5167	0,39179	5,745609	2,552387759
2797	5167	0,33896	7,823209	2,950200614
3198	5167	0,29296	10,227204	3,413435281
3598	5165	0,25596	12,945604	3,906860447
3998	5168	0,22251	15,984004	4,494180037
4398	5168	0,19451	19,342404	5,14112385
4796	5170	0,17151	23,001616	5,830563816
5196	5170	0,15251	26,998416	6,556947085
5596	5170	0,13551	31,315216	7,379529186
5996	5169	0,12130	35,952016	8,244023083

**П.1.6. Результаты измерения активного сопротивления и ёмкости
(0,2 м раствор KCl, T = 303 К)**

f , Гц	R_i , Ом	C_i , мкФ	f^2 , кГц ²	$1/C$, мкФ ⁻¹
798	4757	0,65530	0,636964	1,526018617
1198	4754	0,60051	1,435204	1,665251203

Продолжение табл. П.1.6

f , Гц	R_i , Ом	C_i , мкФ	f^2 , кГц ²	$1/C$, мкФ ⁻¹
1597	4754	0,53051	2,550409	1,884978605
1999	4746	0,47200	3,996001	2,118644068
2398	4732	0,41600	5,750404	2,403846154
2798	4719	0,36700	7,828804	2,724795640
3199	4717	0,32156	10,233601	3,109839532
3598	4717	0,28185	12,945604	3,547986518
3998	4720	0,24785	15,984004	4,034698406
4399	4726	0,21785	19,351201	4,590314437
4796	4721	0,19384	23,001616	5,158893933
5198	4721	0,17284	27,019204	5,785697755
5596	4722	0,15484	31,315216	6,458279514
5995	4725	0,13884	35,940025	7,202535292

**П.1.7. Результаты измерения активного сопротивления и ёмкости
(0,2 м раствор KCl, T = 308 К)**

f , Гц	R_i , Ом	C_i , мкФ	f^2 , кГц ²	$1/C$, мкФ ⁻¹
----------	------------	-------------	--------------------------	---------------------------

798	4346	0,65884	0,636804	1,517819197
1197	4346	0,60484	1,432809	1,653329806
1600	4350	0,54984	2,560000	1,818710898
1999	4347	0,49484	3,996001	2,020855226
2399	4337	0,44284	5,755201	2,258151928
2798	4326	0,39337	7,828804	2,542135903
3197	4322	0,3503	10,220810	2,854695975
3598	4327	0,3103	12,945600	3,222687722
3998	4335	0,2743	15,984000	3,645643456
4400	4341	0,2433	19,360000	4,110152076
4797	4337	0,2183	23,011210	4,580852038
5197	4327	0,1963	27,008810	5,094243505
5598	4324	0,1764	31,337600	5,668934240
5997	4327	0,1584	35,964010	6,313131313

**П.1.8. Результаты измерения активного сопротивления и ёмкости
(0,2 *m* раствор KCl, *T* = 313 К)**

<i>f</i> , Гц	<i>R_i</i> , Ом	<i>C_i</i> , мкФ	<i>f</i> ² , кГц ²	1/ <i>C</i> , мкФ ⁻¹
798	4005	0,66539	0,636166	1,5028780
1197	4000	0,62139	1,432809	1,6092953
1597	3994	0,56668	2,550409	1,7646644
1999	3993	0,51668	3,996001	1,9354339
2398	3992	0,46668	5,750404	2,1427959
2797	3995	0,42053	7,823209	2,3779516
3198	4002	0,37453	10,227200	2,6700131
3598	4009	0,33353	12,945600	2,9982310
3999	4014	0,29953	15,992000	3,3385637
4400	4015	0,26853	19,360000	3,7239787
4795	4003	0,24053	22,992030	4,1574856
5196	4000	0,21753	26,998420	4,5970671
5595	3994	0,19653	31,304030	5,0882817
5996	3991	0,17853	35,952020	5,6012995

**П.1.9. Результаты измерения активного сопротивления и ёмкости
(0,3 *m* раствор KCl, *T* = 298 К)**

<i>f</i> , Гц	<i>R_i</i> , Ом	<i>C_i</i> , мкФ	<i>f</i> ² , кГц ²	1/ <i>C</i> , мкФ ⁻¹
1200	3585	0,59432	1,44	1,682595235
1600	3578	0,54149	2,56	1,846756173
2000	3573	0,49341	4,00	2,026712065
2400	3565	0,44337	5,76	2,255452557
2800	3565	0,40534	7,84	2,467064686
3200	3564	0,37066	10,24	2,697890250
3600	3550	0,34437	12,96	2,903853413
4000	3549	0,32347	16,00	3,091476798
4400	3549	0,30119	19,36	3,320163352
4800	3551	0,27620	23,04	3,620564808
5200	3550	0,25451	27,04	3,929118699
5600	3550	0,23445	31,36	4,265301770
6000	3550	0,21648	36,00	4,619364375

**П.1.10. Результаты измерения активного сопротивления и ёмкости
(0,3 м раствор KCl, T = 303 К)**

f , Гц	R_i , Ом	C_i , мкФ	f^2 , кГц ²	$1/C$, мкФ ⁻¹
1200	3298	0,60861	1,44	1,6430883
1600	3291	0,5534	2,56	1,8070112
2000	3286	0,50766	4,00	1,9698223
2400	3278	0,46446	5,76	2,1530379
2800	3272	0,42806	7,84	2,3361211
3200	3274	0,39401	10,24	2,5380066
3600	3248	0,37766	12,96	2,6478843
4000	3248	0,35162	16,00	2,8439793
4400	3251	0,32290	19,36	3,0969340
4800	3251	0,29845	23,04	3,3506450
5200	3250	0,27622	27,04	3,6203027
5600	3247	0,25629	31,36	3,9018300
6000	3250	0,23673	36	4,2242217

**П.1.11. Результаты измерения активного сопротивления и ёмкости
(0,3 м раствор KCl, T = 308 К)**

f , Гц	R_i , Ом	C_i , мкФ	f^2 , кГц ²	$1/C$, мкФ ⁻¹
1200	3042	0,60771	1,44	1,6455217
1600	3036	0,56054	2,56	1,7839940
2000	3031	0,51721	4,00	1,9334506
2400	3019	0,48000	5,76	2,0833333
2800	3015	0,44373	7,84	2,2536227
3200	3015	0,41180	10,24	2,4283633
3600	2986	0,38210	12,96	2,6171159
4000	2990	0,36100	16,00	2,7700831
4400	2991	0,34052	19,36	2,9366851
4800	2991	0,31958	23,04	3,1291070
5200	2986	0,29723	27,04	3,3643979
5600	2984	0,27693	31,36	3,6110208
6000	2984	0,25765	36,00	3,8812342

**П.1.12. Результаты измерения активного сопротивления и ёмкости
(0,3 м раствор KCl, T = 313 К)**

f , Гц	R_i , Ом	C_i , мкФ	f^2 , кГц ²	$1/C$, мкФ ⁻¹
1200	2774	0,60115	1,44	1,66347833
1600	2763	0,56140	2,56	1,78126113
2000	2759	0,53642	4,00	1,86421088
2400	2752	0,50438	5,76	1,98263214
2800	2751	0,47430	7,84	2,10837023
3200	2750	0,45327	10,24	2,20619057
3600	2769	0,41210	12,96	2,42659549
4000	2771	0,39320	16,00	2,54323499
4400	2771	0,36501	19,36	2,73965097
4800	2767	0,34800	23,04	2,87356322
5200	2765	0,32160	27,04	3,10945274
5600	2763	0,29371	31,36	3,40471894
6000	2761	0,28140	36,00	3,55366027

**П.1.13. Результаты измерения активного сопротивления и ёмкости
(0,4 м раствор KCl, T = 298 К)**

f , Гц	R_i , Ом	C_i , мкФ	f^2 , кГц ²	$1/C$, мкФ ⁻¹
1200	2750	0,65261	1,44	1,532309
1600	2743	0,61278	2,56	1,631907
2000	2739	0,57471	4,00	1,740008
2400	2730	0,52931	5,76	1,889252
2800	2730	0,49480	7,84	2,021019
3200	2729	0,46166	10,24	2,166096
3600	2723	0,43426	12,96	2,302768
4000	2723	0,41804	16,00	2,392116
4400	2723	0,39174	19,36	2,552714
4800	2724	0,36571	23,04	2,734407
5200	2723	0,34250	27,04	2,919708
5600	2724	0,32032	31,36	3,121878
6000	2723	0,30000	36,00	3,333333

**П.1.14. Результаты измерения активного сопротивления и ёмкости
(0,4 м раствор KCl, T = 303 К)**

f , Гц	R_i , Ом	C_i , мкФ	f^2 , кГц ²	$1/C$, мкФ ⁻¹
1200	2528	0,66266	1,44	1,50906951
1600	2522	0,62112	2,56	1,60999485
2000	2518	0,58540	4,00	1,70823369
2400	2510	0,54875	5,76	1,82232346
2800	2505	0,51648	7,84	1,93618340
3200	2507	0,48474	10,24	2,06296159
3600	2494	0,45823	12,96	2,18231019
4000	2494	0,43878	16,00	2,27904645
4400	2496	0,41167	19,36	2,42913013
4800	2496	0,38726	23,04	2,58224449
5200	2496	0,36453	27,04	2,74325844
5600	2495	0,34350	31,36	2,91120815
6000	2496	0,32169	36,00	3,10858280

**П.1.15. Результаты измерения активного сопротивления и ёмкости
(0,4 м раствор KCl, T = 308 К)**

f , Гц	R_i , Ом	C_i , мкФ	f^2 , кГц ²	$1/C$, мкФ ⁻¹
1200	2335	0,65664	1,44	1,52290448
1600	2329	0,62260	2,56	1,60616768
2000	2324	0,58918	4,00	1,69727418
2400	2313	0,55984	5,76	1,78622464
2800	2310	0,52886	7,84	1,89085958
3200	2310	0,49986	10,24	2,00056016
3600	2296	0,47590	12,96	2,10128178
4000	2301	0,45449	16,00	2,20026843
4400	2299	0,42832	19,36	2,33470303
4800	2301	0,40571	23,04	2,46481477
5200	2299	0,38361	27,04	2,60681421
5600	2296	0,36335	31,36	2,75216733
6000	2296	0,34341	36,00	2,91197111

**П.1.16. Результаты измерения активного сопротивления и ёмкости
(0,4 м раствор KCl, T = 313 К)**

f , Гц	R_i , Ом	C_i , мкФ	f^2 , кГц ²	$1/C$, мкФ ⁻¹
1200	2140	0,66550	1,44	1,502630
1600	2135	0,63224	2,56	1,581678
2000	2130	0,60191	4,00	1,661378
2400	2124	0,57854	5,76	1,728489
2800	2123	0,54994	7,84	1,818380
3200	2122	0,52126	10,24	1,918428
3600	2132	0,49672	12,96	2,013207
4000	2134	0,47201	16,00	2,118599
4400	2133	0,44655	19,36	2,239391
4800	2131	0,42344	23,04	2,361610
5200	2130	0,40190	27,04	2,488181
5600	2128	0,38094	31,36	2,625085
6000	2127	0,36213	36,00	2,761439

**П.1.17. Результаты измерения активного сопротивления и ёмкости
(0,5 м раствор KCl, T = 298 К)**

f , Гц	R_i , Ом	C_i , мкФ	f^2 , кГц ²	$1/C$, мкФ ⁻¹
1200	2238	0,69585	1,44	1,4370913
1600	2232	0,66638	2,56	1,5006453
2000	2228	0,6365	4,00	1,5710919
2400	2220	0,59738	5,76	1,6739764
2800	2220	0,56648	7,84	1,7652874
3200	2219	0,53578	10,24	1,8664377
3600	2217	0,50338	12,96	1,9865708
4000	2218	0,49035	16,00	2,0393596
4400	2217	0,46525	19,36	2,1493821
4800	2218	0,43913	23,04	2,277230
5200	2217	0,41528	27,04	2,4080139
5600	2217	0,39195	31,36	2,5513458
6000	2217	0,37035	36,00	2,7001485

**П.1.18. Результаты измерения активного сопротивления и ёмкости
(0,5 *m* раствор KCl, *T* = 303 К)**

f , Гц	R_i , Ом	C_i , мкФ	f^2 , кГц ²	$1/C$, мкФ ⁻¹
1200	2057	0,703175	1,44	1,422121
1600	2051	0,672400	2,56	1,487210
2000	2048	0,644800	4,00	1,550868
2400	2040	0,614450	5,76	1,627472
2800	2037	0,586200	7,84	1,705902
3200	2038	0,557375	10,24	1,794124
3600	2032	0,525375	12,96	1,903402
4000	2032	0,509300	16,00	1,963479
4400	2034	0,483975	19,36	2,066222
4800	2034	0,460150	23,04	2,173204
5200	2034	0,437450	27,04	2,285976
5600	2034	0,415950	31,36	2,404135
6000	20345	0,393000	36,00	2,544529

**П.1.19. Результаты измерения активного сопротивления и ёмкости
(0,5 *m* раствор KCl, *T* = 308 К)**

f , Гц	R_i , Ом	C_i , мкФ	f^2 , кГц ²	$1/C$, мкФ ⁻¹
1200	1902	0,69415	1,44	1,44061082
1600	1897	0,67010	2,56	1,49231458
2000	1892	0,64475	4,00	1,55098876
2400	1881	0,62163	5,76	1,60867397
2800	1878	0,59545	7,84	1,67940213
3200	1878	0,56960	10,24	1,75561798
3600	1873	0,53878	12,96	1,85604514
4000	1878	0,52143	16,00	1,91780296
4400	1875	0,49770	19,36	2,00924252
4800	1878	0,47645	23,04	2,09885612
5200	1877	0,45503	27,04	2,19765730
5600	1874	0,43520	31,36	2,29779412
6000	1874	0,41513	36,00	2,40888396

**П.1.20. Результаты измерения активного сопротивления и ёмкости
(0,5 *m* раствор KCl, *T* = 313 К)**

f , Гц	R_i , Ом	C_i , мкФ	f^2 , кГц ²	$1/C$, мкФ ⁻¹
1200	1755	0,69988	1,44	1,4288164
1600	1748	0,67570	2,56	1,4799467
2000	1743	0,65288	4,00	1,5316750
2400	1738	0,63523	5,76	1,5742330
2800	1737	0,61225	7,84	1,6333197
3200	1735	0,58755	10,24	1,7019828
3600	1740	0,55745	12,96	1,7938829
4000	1742	0,53630	16,00	1,8646280
4400	1741	0,51353	19,36	1,9473059
4800	1740	0,49268	23,04	2,0297150
5200	1739	0,47228	27,04	2,1173880
5600	1738	0,45213	31,36	2,2117533
6000	1738	0,43338	36,00	2,3074438

**П.1.21. Результаты измерения активного сопротивления и ёмкости
(0,6 *m* раствор KCl, *T* = 298 К)**

f , Гц	R_i , Ом	C_i , мкФ	f^2 , кГц ²	$1/C$, мкФ ⁻¹
797	1887	0,75091	0,635687	1,33171752
1200	1877	0,72642	1,440000	1,37661408
1598	1870	0,70300	2,553604	1,42247511
1996	1866	0,68230	3,984016	1,46563095
2400	1865	0,65730	5,760000	1,52137532
2798	1865	0,63230	7,828804	1,58152776
3198	1866	0,60591	10,227204	1,65041013
3598	1867	0,57991	12,945604	1,72440551
3999	1863	0,55400	15,992001	1,80505415
4400	1862	0,52910	19,360000	1,89000189
4798	1865	0,50205	23,020804	1,99183348
5195	1865	0,47605	26,988025	2,10061968
5595	1867	0,45100	31,304025	2,21729490
5995	1866	0,42800	35,940025	2,33644860

**П.1.22. Результаты измерения активного сопротивления и ёмкости
(0,6 м раствор KCl, T = 303 К)**

f , Гц	R_i , Ом	C_i , мкФ	f^2 , кГц ²	$1/C$, мкФ ⁻¹
797	1733,13	0,75382	0,635687	1,32657664
1197	1723,13	0,73082	1,432809	1,36832599
1598	1719,13	0,71000	2,553604	1,40845070
1998	1717,00	0,69000	3,992004	1,44927536
2398	1713,00	0,66910	5,750404	1,49454491
2797	1710,20	0,64692	7,823209	1,54578619
3199	1711,19	0,62292	10,233601	1,60534258
3597	1713,00	0,60000	12,938409	1,66666667
3998	1710,45	0,57573	15,984004	1,73692529
4399	1712,45	0,55032	19,351201	1,81712458
4797	1716,45	0,52700	23,011209	1,89753321
5197	1715,00	0,50300	27,008809	1,98807157
5596	1711,00	0,480000	31,315216	2,08333333
5997	1714,41	0,455100	35,964009	2,19731927

**П.1.23. Результаты измерения активного сопротивления и ёмкости
(0,6 м раствор KCl, T = 308 К)**

f , Гц	R_i , Ом	C_i , мкФ	f^2 , кГц ²	$1/C$, мкФ ⁻¹
798	1603,39	0,73715	0,6361658	1,3565760
1198	1597,39	0,71515	1,435204	1,39830805
1596	1591,39	0,69655	2,547216	1,43564712
1996	1588,35	0,67900	3,984016	1,47275405
2397	1583,52	0,66173	5,745609	1,51119036
2798	1583,05	0,64173	7,828804	1,55828775
3198	1585,05	0,62100	10,227204	1,61030596
3597	1584,00	0,60100	12,938409	1,66389351
3997	1583,19	0,57995	15,976009	1,72428658
4399	1578,09	0,55920	19,351201	1,78826896
4796	1581,14	0,53720	23,001616	1,86150410
5197	1584,00	0,51520	27,008809	1,94099379
5596	1582,22	0,49558	31,315216	2,01783769
5995	1580,22	0,47458	35,940025	2,10712630

**П.1.24. Результаты измерения активного сопротивления и ёмкости
(0,6 м раствор KCl, T = 313 К)**

f , Гц	R_i , Ом	C_i , мкФ	f^2 , кГц ²	$1/C$, мкФ ⁻¹
798	1487,22	0,73258	0,636166	1,36503863
1198	1478,22	0,71258	1,435204	1,40335120
1596	1474,22	0,69558	2,547216	1,43764916
1996	1471,29	0,68000	3,984016	1,47058824
2397	1471,00	0,66300	5,745609	1,50829563
2798	1470,00	0,64600	7,828804	1,54798762
3198	1469,00	0,62838	10,22720	1,59139374
3597	1470,00	0,60879	12,93841	1,64260254
3997	1469,46	0,59079	15,97601	1,69264883
4399	1469,06	0,57032	19,35120	1,75340160
4796	1471,00	0,55158	23,00162	1,81297364
5197	1471,00	0,53058	27,00881	1,88472992
5596	1471,00	0,51232	31,31522	1,95190506
5995	1470,00	0,49200	35,94003	2,03252033

**П.1.25. Результаты измерения активного сопротивления и ёмкости
(0,7 м раствор KCl, T = 298 К)**

f , Гц	R_i , Ом	C_i , мкФ	f^2 , кГц ²	$1/C$, мкФ ⁻¹
797	1647,85	0,71159	0,635528	1,405303616
1198	1632,15	0,68747	1,435204	1,454608928
1598	1626,13	0,67318	2,553604	1,485486794
1998	1624,29	0,65518	3,992004	1,526298117
2397	1625,59	0,63718	5,745609	1,569415236
2798	1626,00	0,61774	7,828804	1,618804028
3198	1624,30	0,59950	10,227204	1,668056714
3597	1625,34	0,57900	12,938409	1,727115717
3999	1621,33	0,55840	15,992001	1,790830946
4395	1621,83	0,53862	19,316025	1,856596487
4799	1621,83	0,51837	23,030401	1,929123985
5198	1619,71	0,49800	27,019204	2,008032129
5596	1617,71	0,47853	31,315216	2,089733141
5998	1618,71	0,45653	35,976004	2,190436554

**П.1.26. Результаты измерения активного сопротивления и ёмкости
(0,7 м раствор KCl, T = 303 К)**

f , Гц	R_i , Ом	C_i , мкФ	f^2 , кГц ²	$1/C$, мкФ ⁻¹
799	1513,00	0,72436	0,637922	1,38052902
1199	1497,17	0,70241	1,437601	1,42366994
1598	1492,17	0,68341	2,553604	1,46325046
1998	1493,22	0,66536	3,992004	1,50294577
2398	1493,36	0,64900	5,750404	1,54083205
2798	1489,75	0,63068	7,828804	1,58559016
3198	1495,00	0,61327	10,2272	1,63060316
3600	1491,00	0,59427	12,9600	1,68273680
3999	1490,00	0,57567	15,9920	1,73710633
4398	1490,00	0,55667	19,3424	1,79639643
4796	1491,00	0,53661	23,00162	1,86355081
5197	1490,00	0,51761	27,00881	1,93195649
5596	1486,09	0,49900	31,31522	2,00400802
5997	1487,09	0,47952	35,96401	2,08541875

**П.1.27. Результаты измерения активного сопротивления и ёмкости
(0,7 м раствор KCl, T = 308 К)**

f , Гц	R_i , Ом	C_i , мкФ	f^2 , кГц ²	$1/C$, мкФ ⁻¹
798	1396,09	0,73002	0,636006	1,369825484
1195	1392,66	0,70740	1,428025	1,413627368
1598	1384,30	0,69195	2,553604	1,445191127
1998	1381,30	0,67595	3,992004	1,479399364
2399	1379,39	0,66000	5,755201	1,515151515
2798	1377,39	0,64400	7,828804	1,552795031
3198	1376,48	0,62800	10,227204	1,592356688
3598	1375,47	0,61100	12,945604	1,636661211
3999	1378,49	0,59380	15,992001	1,684068710
4400	1376,09	0,57535	19,360000	1,738072478
4797	1381,41	0,55836	23,011209	1,790959238
5196	1375,33	0,54168	26,998416	1,846108403
5595	1374,52	0,52500	31,304025	1,904761905
5995	1374,47	0,50740	35,940025	1,970831691

**П.1.28. Результаты измерения активного сопротивления и ёмкости
(0,7 м раствор KCl, T = 313 К)**

f , Гц	R_i , Ом	C_i , мкФ	f^2 , кГц ²	$1/C$, мкФ ⁻¹
798	1305,34	0,74937	0,637123	1,334454275
1197	1293,34	0,72637	1,432809	1,376708840
1597	1289,34	0,70937	2,550409	1,409701566
1998	1285,34	0,69437	3,992004	1,440154385
2400	1283,53	0,67900	5,760000	1,472754050
2799	1282,37	0,66400	7,834401	1,506024096
3198	1280,00	0,64800	10,227204	1,543209877
3599	1279,00	0,63223	12,952801	1,581702861
3998	1278,00	0,61525	15,984004	1,625355547
4400	1278,00	0,59825	19,360000	1,671541997
4796	1279,00	0,58100	23,001616	1,721170396
5197	1278,00	0,56500	27,008809	1,769911504
5597	1279,10	0,54600	31,326409	1,831501832
5995	1279,10	0,53136	35,940025	1,881963264

**П.1.29. Результаты измерения активного сопротивления и ёмкости
(0,8 м раствор KCl, T = 298 К)**

f , Гц	R_i , Ом	C_i , мкФ	f^2 , кГц ²	$1/C$, мкФ ⁻¹
1200	1451	0,73523	1,44	1,3601186
1600	1446	0,72094	2,56	1,3870780
2000	1443	0,70485	4,00	1,4187416
2400	1435	0,69433	5,76	1,4402374
2800	1436	0,67476	7,84	1,4820084
3200	1435	0,65678	10,24	1,5225799
3600	1438	0,63402	12,96	1,5772373
4000	1439	0,60380	16,00	1,6561775
4400	1438	0,58354	19,36	1,7136786
4800	1438	0,56281	23,04	1,7767986
5200	1438	0,54226	27,04	1,8441338
5600	1438	0,52148	31,36	1,9176191
6000	1437	0,50249	36,00	1,9900894

**П.1.30. Результаты измерения активного сопротивления и ёмкости
(0,8 м раствор KCl, T = 303 К)**

f , Гц	R_i , Ом	C_i , мкФ	f^2 , кГц ²	$1/C$, мкФ ⁻¹
1200	1332	0,74346	1,44	1,345062
1600	1328	0,72752	2,56	1,374533
2000	1325	0,71296	4,00	1,402603
2400	1319	0,69997	5,76	1,428633
2800	1317	0,68324	7,84	1,463615
3200	1318	0,66666	10,24	1,500015
3600	1320	0,64625	12,96	1,547389
4000	1320	0,62102	16,00	1,610254
4400	1321	0,60209	19,36	1,660881
4800	1321	0,5833	23,04	1,714384
5200	1322	0,56383	27,04	1,773584
5600	1322	0,54482	31,36	1,835469
6000	1322	0,52507	36,00	1,904508

**П.1.31. Результаты измерения активного сопротивления и ёмкости
(0,8 м раствор KCl, T = 308 К)**

f , Гц	R_i , Ом	C_i , мкФ	f^2 , кГц ²	$1/C$, мкФ ⁻¹
1200	1234	0,73824	1,44	1,3545730
1600	1230	0,72516	2,56	1,3790060
2000	1226	0,71298	4,00	1,4025639
2400	1217	0,69860	5,76	1,4314343
2800	1215	0,68390	7,84	1,4622021
3200	1215	0,66890	10,24	1,4949918
3600	1220	0,64990	12,96	1,5386983
4000	1225	0,62943	16,00	1,5887390
4400	1220	0,61324	19,36	1,6306829
4800	1224	0,59629	23,04	1,6770363
5200	1224	0,57947	27,04	1,7257149
5600	1221	0,56329	31,36	1,7752845
6000	1221	0,54599	36,00	1,8315354

**П.1.32. Результаты измерения активного сопротивления и ёмкости
(0,8 м раствор KCl, T = 313 К)**

f , Гц	R_i , Ом	C_i , мкФ	f^2 , кГц ²	$1/C$, мкФ ⁻¹
1200	1152	0,74310	1,44	1,3457139
1600	1147	0,73016	2,56	1,3695628
2000	1142	0,71861	4,00	1,3915754
2400	1138	0,70038	5,76	1,4277963
2800	1137	0,68766	7,84	1,4542070
3200	1136	0,67422	10,24	1,4831954
3600	1135	0,65696	12,96	1,5221627
4000	1136	0,64215	16,00	1,5572686
4400	1136	0,62705	19,36	1,5947692
4800	1136	0,61208	23,04	1,6337734
5200	1135	0,59614	27,04	1,6774583
5600	1135	0,58146	31,36	1,7198088
6000	1135	0,56463	36,00	1,7710713

**П.1.33. Результаты измерения активного сопротивления и емкости
(0,9 м раствор KCl, T = 298 К)**

f , Гц	R_i , Ом	C_i , мкФ	f^2 , кГц ²	$1/C$, мкФ ⁻¹
799	1310,52	0,78376	0,638081	1,275900786
1200	1302,07	0,76082	1,440000	1,314371336
1598	1299,00	0,74265	2,553604	1,346529321
1998	1295,23	0,72500	3,992004	1,379310345
2398	1293,43	0,71025	5,750404	1,407954945
2798	1293,52	0,69178	7,828804	1,445546272
3197	1293,59	0,67678	10,220809	1,477585035
3598	1293,59	0,65778	12,945604	1,520265134
3998	1293,59	0,64078	15,984004	1,560598021
4399	1293,59	0,62078	19,351201	1,610876639
4796	1294,64	0,60078	23,001616	1,664502813
5198	1294,64	0,58378	27,019204	1,712974066
5594	1295,25	0,56240	31,292836	1,778093883
5997	1294,26	0,55140	35,964009	1,813565470

**П.1.34. Результаты измерения активного сопротивления и ёмкости
(0,9 м раствор KCl, T = 303 К)**

f , Гц	R_i , Ом	C_i , мкФ	f^2 , кГц ²	$1/C$, мкФ ⁻¹
797	1210,29	0,77954	0,635528	1,282807810
1198	1201,29	0,76154	1,435204	1,313128660
1598	1195,29	0,73973	2,553604	1,351844592
1997	1192,36	0,72500	3,988009	1,379310345
2397	1190,54	0,71067	5,745609	1,407122856
2798	1189,54	0,69567	7,828804	1,437463165
3198	1188,87	0,68167	10,227204	1,466985492
3598	1189,37	0,66567	12,945604	1,502245858
3998	1190,00	0,64967	15,984004	1,539243000
4400	1190,00	0,63267	19,360000	1,580602842
4795	1189,20	0,61567	22,992025	1,624246756
5197	1188,22	0,59830	27,008809	1,671402307
5597	1188,28	0,58130	31,326409	1,720282126
5998	1189,14	0,56430	35,976004	1,772107035

**П.1.35. Результаты измерения активного сопротивления и ёмкости
(0,9 м раствор KCl, T = 308 К)**

f , Гц	R_i , Ом	C_i , мкФ	f^2 , кГц ²	$1/C$, мкФ ⁻¹
797	1116,23	0,76792	0,635687	1,302218981
1196	1109,23	0,74692	1,430416	1,338831468
1597	1104,30	0,73100	2,550409	1,367989056
1997	1100,32	0,71799	3,988009	1,392777058
2397	1096,36	0,70598	5,745609	1,416470722
2798	1094,36	0,69238	7,828804	1,444293596
3198	1095,39	0,67939	10,227204	1,471908624
3598	1097,55	0,66460	12,945604	1,504664460
3998	1098,46	0,65060	15,984004	1,537042730
4398	1097,53	0,63560	19,342404	1,573316551
4799	1097,53	0,62160	23,030401	1,608751609
5199	1098,53	0,60660	27,029601	1,648532806
5597	1098,53	0,59160	31,326409	1,690331305
5998	1097,53	0,57660	35,976004	1,734304544

**П.1.36. Результаты измерения активного сопротивления и ёмкости
(0,9 м раствор KCl, T = 313 К)**

f , Гц	R_i , Ом	C_i , мкФ	f^2 , кГц ²	$1/C$, мкФ ⁻¹
798	1047,09	0,75965	0,6379217	1,316395709
1198	1037,09	0,73965	1,435204	1,351990806
1598	1032,09	0,72565	2,553604	1,378074829
1998	1027,28	0,71243	3,992004	1,403646674
2398	1024,28	0,70043	5,750404	1,427694416
2799	1022,32	0,68847	7,834401	1,452496115
3197	1021,35	0,67672	10,220809	1,477716042
3598	1023,71	0,66378	12,945604	1,506523246
3999	1024,82	0,65079	15,992001	1,536593986
4399	1024,30	0,63739	19,351201	1,568898163
4799	1023,40	0,62539	23,030401	1,599002223
5197	1022,65	0,61239	27,008809	1,632946325
5598	1021,72	0,60344	31,337604	1,657165584
5995	1022,80	0,58544	35,940025	1,708116972

**П.1.37. Результаты измерения активного сопротивления и ёмкости
(1,0 м раствор KCl, T = 298 К)**

f , Гц	R_i , Ом	C_i , мкФ	f^2 , кГц ²	$1/C$, мкФ ⁻¹
798	1216,00	0,6951	0,636804	1,438641922
1197	1196,00	0,6730	1,432809	1,485884101
1597	1191,00	0,6580	2,550409	1,519756839
1998	1188,50	0,6430	3,992004	1,555209953
3995	1177,50	0,5750	15,960025	1,739130435
4396	1175,39	0,5600	19,324816	1,785714286
4796	1174,00	0,5490	23,001616	1,821493625
5198	1174,22	0,5341	27,019204	1,872308556
5599	1174,59	0,5217	31,348801	1,916920659
5998	1174,56	0,5067	35,976004	1,973671226

**П.1.38. Результаты измерения активного сопротивления и ёмкости
(1,0 м раствор KCl, T = 303 К)**

f , Гц	R_i , Ом	C_i , мкФ	f^2 , кГц ²	$1/C$, мкФ ⁻¹
799	1106,00	0,72080	0,63824121	1,387347392

f , Гц	R_i , Ом	C_i , мкФ	f^2 , кГц ²	$1/C$, мкФ ⁻¹
1198	1094,00	0,69500	1,435204	1,438848921
1597	1091,00	0,67800	2,550409	1,474926254
1998	1087,42	0,66310	3,992004	1,508068165
3997	1075,6	0,60010	15,976009	1,666388935
4397	1077,71	0,58610	19,333609	1,706193482
4797	1076,75	0,57377	23,011209	1,742858637
5200	1080,75	0,55883	27,040000	1,789452964
5598	1085,75	0,54454	31,337604	1,836412385
5998	1082,75	0,53253	35,976004	1,877828479

**П.1.39. Результаты измерения активного сопротивления и ёмкости
(1,0 м раствор KCl, T = 308 К)**

f , Гц	R_i , Ом	C_i , мкФ	f^2 , кГц ²	$1/C$, мкФ ⁻¹
798	1028,75	0,73621	0,636804	1,358308091
1198	1015,75	0,71021	1,435204	1,408034243
1595	1015,75	0,69016	2,544025	1,448939376
1997	1010,48	0,67870	3,988009	1,473405039
3998	1006,78	0,61585	15,984004	1,623772022
4398	998,00	0,60585	19,342404	1,650573574
4797	1004,08	0,59062	23,011209	1,693136027
5196	1006,09	0,57910	26,998416	1,726817475
5596	1000,10	0,56769	31,315216	1,761524776
5995	1001,00	0,55447	35,940025	1,803524086

**П.1.40. Результаты измерения активного сопротивления и ёмкости
(1,0 м раствор KCl, T = 313 К)**

f , Гц	R_i , Ом	C_i , мкФ	f^2 , кГц ²	$1/C$, мкФ ⁻¹
798	965	0,75363	0,637283	1,326911084
1199	951	0,72863	1,437601	1,372438686
1598	945	0,71063	2,553604	1,407202060
1998	938	0,69863	3,992004	1,431372830
3999	930	0,63963	15,992001	1,563403843
4398	929	0,62963	19,342404	1,588234360
4797	928	0,61715	23,011209	1,620351616
5196	928	0,60415	26,998416	1,655218075
5595	927	0,59400	31,304025	1,683501684
5995	927	0,58100	35,940025	1,721170396

Приложение 2

ДАННЫЕ ДЛЯ РАСТВОРОВ NaCl

**П.2.1. Результаты измерения активного сопротивления и ёмкости
(0,1 м раствор NaCl, T = 298 К)**

f , Гц	R_i , Ом	C_i , мкФ	f^2 , кГц ²	$1/C$, мкФ ⁻¹
400	12148	0,870	0,16	1,149425287
800	11973	0,596	0,64	1,677852349
1200	11973	0,400	1,44	2,500000000
1600	12055	0,270	2,56	3,703703704
2000	12063	0,193	4,00	5,181347150

**П.2.2. Результаты измерения активного сопротивления и ёмкости
(0,1 м раствор NaCl, T = 303 К)**

f , Гц	R_i , Ом	C_i , мкФ	f^2 , кГц ²	$1/C$, мкФ ⁻¹
400	11055	0,810	0,16	1,234567901
800	10940	0,636	0,64	1,572327044
1200	10910	0,436	1,44	2,293577982
1600	10900	0,312	2,56	3,205128205
2000	10880	0,222	4,00	4,504504505

П.2.3. Результаты измерения активного сопротивления и ёмкости

(0,1 m раствор NaCl, T = 308 K)

f , Гц	R_i , Ом	C_i , мкФ	f^2 , кГц	$1/C$, мкФ ⁻¹
400	10030	0,932	0,16	1,072961373
800	9981	0,670	0,64	1,492537313
1200	10001	0,470	1,44	2,127659574
1600	10071	0,332	2,56	3,012048193
2000	10101	0,243	4,00	4,115226337

**П.2.4. Результаты измерения активного сопротивления и ёмкости
(0,1 m раствор NaCl, T = 313 K)**

f , Гц	R_i , Ом	C_i , мкФ	f^2 , кГц ²	$1/C$, мкФ ⁻¹
1200	8916	0,438	1,44	2,28310502
1600	8906	0,336	2,56	2,97619048
2000	8874	0,264	4,00	3,78787879
2400	8920	0,207	5,76	4,83091787
2800	8883	0,167	7,84	5,98802395

**П.2.5. Результаты измерения активного сопротивления и ёмкости
(0,2 м раствор NaCl, T = 298 К)**

$f, \text{Гц}$	$R_i, \text{Ом}$	$C_i, \text{мкФ}$	$f^2, \text{кГц}^2$	$1/C, \text{мкФ}^{-1}$
1200	6432	0,752	1,44	1,3297872
1600	6427	0,686	2,56	1,4577259
2000	6425	0,584	4,00	1,7123288
2400	6423	0,489	5,76	2,0449898
2800	6421	0,407	7,84	2,4570025
3200	6420	0,347	10,24	2,8818444

**П.2.6. Результаты измерения активного сопротивления и ёмкости
(0,2 м раствор NaCl, T = 303 К)**

$f, \text{Гц}$	$R_i, \text{Ом}$	$C_i, \text{мкФ}$	$f^2, \text{кГц}^2$	$1/C, \text{мкФ}^{-1}$
1200	5855	0,7482	1,44	1,3365410
1600	5844	0,6332	2,56	1,5792798
2000	5836	0,5455	4,00	1,8331806
2400	5839	0,4570	5,76	2,1881838
2800	5852	0,3889	7,84	2,5713551
3200	5856	0,3322	10,24	3,0102348

**П.2.7. Результаты измерения активного сопротивления и ёмкости
(0,2 м раствор NaCl, T = 308 К)**

$f, \text{Гц}$	$R_i, \text{Ом}$	$C_i, \text{мкФ}$	$f^2, \text{кГц}^2$	$1/C, \text{мкФ}^{-1}$
1200	5504	0,6947	1,44	1,4394703
1600	5510	0,6089	2,56	1,6423058
2000	5526	0,5332	4,00	1,8754689
2400	5528	0,4524	5,76	2,2104332
2800	5536	0,3911	7,84	2,5568908
3200	5538	0,3380	10,24	2,9585799

**П.2.8. Результаты измерения активного сопротивления и ёмкости
(0,2 м раствор NaCl, T = 313 К)**

$f, \text{Гц}$	$R_i, \text{Ом}$	$C_i, \text{мкФ}$	$f^2, \text{кГц}^2$	$1/C, \text{мкФ}^{-1}$
1200	5697	0,6855	1,44	1,4587892
1600	5695	0,6035	2,56	1,6570008
2000	5690	0,5239	4,00	1,9087612
2400	5684	0,4563	5,76	2,1915407
2800	5672	0,3959	7,84	2,5258904
3200	5667	0,3489	10,24	2,8661508

**П.2.9. Результаты измерения активного сопротивления и ёмкости
(0,3 м раствор NaCl, T = 298 К)**

$f, \text{Гц}$	$R_i, \text{Ом}$	$C_i, \text{мкФ}$	$f^2, \text{кГц}^2$	$1/C, \text{мкФ}^{-1}$
400	4480	0,860	0,16	1,162790698
800	4424	0,771	0,64	1,297016861
1200	4455	0,676	1,44	1,479289941
1600	4462	0,601	2,56	1,663893511
2000	4440	0,529	4,00	1,890359168

**П.2.10. Результаты измерения активного сопротивления и ёмкости
(0,3 м раствор NaCl, T = 303 К)**

$f, \text{Гц}$	$R_i, \text{Ом}$	$C_i, \text{мкФ}$	$f^2, \text{кГц}^2$	$1/C, \text{мкФ}^{-1}$
400	4098	0,892	0,16	1,121076233
800	4056	0,793	0,64	1,261034048
1200	4020	0,731	1,44	1,367989056
1600	4029	0,633	2,56	1,579778831
2000	4010	0,563	4,00	1,776198934
2400	4039	0,486	5,76	2,057613169
2800	4046	0,432	7,84	2,314814815
3200	4052	0,382	10,24	2,617801047

**П.2.11. Результаты измерения активного сопротивления и ёмкости
(0,3 м раствор NaCl, T = 308 К)**

$f, \text{Гц}$	$R_i, \text{Ом}$	$C_i, \text{мкФ}$	$f^2, \text{кГц}^2$	$1/C, \text{мкФ}^{-1}$
----------------	------------------	-------------------	---------------------	------------------------

800	4035	0,767	0,64	1,303780965
1200	4025	0,692	1,44	1,445086705
1600	4026	0,616	2,56	1,623376623
2000	4026	0,554	4,00	1,805054152
2400	4022	0,491	5,76	2,036659878
2800	4023	0,435	7,84	2,298850575
3200	4023	0,386	10,24	2,590673575

**П.2.12. Результаты измерения активного сопротивления и ёмкости
(0,3 м раствор NaCl, T = 313 К)**

$f, \text{Гц}$	$R_i, \text{Ом}$	$C_i, \text{мкФ}$	$f^2, \text{кГц}^2$	$1/C, \text{мкФ}^{-1}$
800	3951	0,756	0,64	1,322751323
1200	3925	0,690	1,44	1,449275362
1600	3914	0,622	2,56	1,607717042
2000	3904	0,550	4,00	1,818181818
2400	3895	0,480	5,76	2,083333333
2800	3881	0,434	7,84	2,304147465
3200	3880	0,404	10,24	2,475247525

**П.2.13. Результаты измерения активного сопротивления и ёмкости
(0,4 м раствор NaCl, T = 298 К)**

$f, \text{Гц}$	$R_i, \text{Ом}$	$C_i, \text{мкФ}$	$f^2, \text{кГц}^2$	$1/C, \text{мкФ}^{-1}$
1200	3458	0,6750	1,44	1,481481
1600	3456	0,6274	2,56	1,593880
2000	3460	0,5727	4,00	1,746115
2400	3455	0,5277	5,76	1,895016
2800	3453	0,4812	7,84	2,078138
3200	3450	0,4472	10,24	2,236136

**П.2.14. Результаты измерения активного сопротивления и ёмкости
(0,4 м раствор NaCl, T = 303 К)**

$f, \text{Гц}$	$R_i, \text{Ом}$	$C_i, \text{мкФ}$	$f^2, \text{кГц}^2$	$1/C, \text{мкФ}^{-1}$
1200	3193	0,6893	1,44	1,450747
1600	3185	0,6396	2,56	1,563477
2000	3170	0,5887	4,00	1,698658
2400	3168	0,5435	5,76	1,839926
2800	3159	0,5040	7,84	1,984127
3200	3162	0,4576	10,24	2,185315

**П.2.15. Результаты измерения активного сопротивления и ёмкости
(0,4 м раствор NaCl, T = 308 К)**

$f, \text{Гц}$	$R_i, \text{Ом}$	$C_i, \text{мкФ}$	$f^2, \text{кГц}^2$	$1/C, \text{мкФ}^{-1}$
1200	2966	0,6732	1,44	1,485443
1600	2970	0,6300	2,56	1,587302
2000	2963	0,5920	4,00	1,689189
2400	2959	0,5505	5,76	1,81653
2800	2949	0,5166	7,84	1,935734
3200	2954	0,4764	10,24	2,099076

**П.2.16. Результаты измерения активного сопротивления и ёмкости
(0,4 м раствор NaCl, T = 313 К)**

$f, \text{Гц}$	$R_i, \text{Ом}$	$C_i, \text{мкФ}$	$f^2, \text{кГц}^2$	$1/C, \text{мкФ}^{-1}$
1200	2933	0,6510	1,44	1,536098
1600	2915	0,6150	2,56	1,626016
2000	2908	0,5812	4,00	1,720578
2400	2901	0,5450	5,76	1,834862
2800	2896	0,5150	7,84	1,941748
3200	2892	0,4894	10,24	2,043318

**П.2.17. Результаты измерения активного сопротивления и ёмкости
(0,5 м раствор NaCl, T = 298 К)**

$f, \text{Гц}$	$R_i, \text{Ом}$	$C_i, \text{мкФ}$	$f^2, \text{кГц}^2$	$1/C, \text{мкФ}^{-1}$
800	2843	0,729	0,64	1,37174211
1200	2833	0,684	1,44	1,46198830
1600	2846	0,64	2,56	1,56250000
2000	2847	0,598	4,00	1,67224080
2400	2849	0,558	5,76	1,79211470
2800	2849	0,518	7,84	1,93050193
3200	2849	0,477	10,24	2,09643606

**П.2.18. Результаты измерения активного сопротивления и ёмкости
(0,5 м раствор NaCl, T = 303 К)**

$f, \text{Гц}$	$R_i, \text{Ом}$	$C_i, \text{мкФ}$	$f^2, \text{кГц}^2$	$1/C, \text{мкФ}^{-1}$
800	2695	0,742	0,64	1,34770889
1200	2686	0,697	1,44	1,43472023
1600	2668	0,65	2,56	1,53846154
2000	2675	0,617	4,00	1,62074554
2400	2669	0,580	5,76	1,72413793
2800	2667	0,540	7,84	1,85185185
3200	2665	0,502	10,24	1,99203187

**П.2.19. Результаты измерения активного сопротивления и ёмкости
(0,5 м раствор NaCl, T = 308 К)**

$f, \text{Гц}$	$R_i, \text{Ом}$	$C_i, \text{мкФ}$	$f^2, \text{кГц}^2$	$1/C, \text{мкФ}^{-1}$
800	2500	0,757	0,64	1,321003963
1200	2490	0,716	1,44	1,396648045
1600	2484	0,675	2,56	1,481481481
2000	2479	0,637	4,00	1,569858713
2400	2476	0,599	5,76	1,669449082
2800	2476	0,563	7,84	1,776198934
3200	2472	0,525	10,24	1,904761905

**П.2.20. Результаты измерения активного сопротивления и ёмкости
(0,5 м раствор NaCl, T = 313 К)**

$f, \text{Гц}$	$R_i, \text{Ом}$	$C_i, \text{мкФ}$	$f^2, \text{кГц}^2$	$1/C, \text{мкФ}^{-1}$
800	2338	0,786	0,64	1,272264631
1200	2317	0,742	1,44	1,347708895
1600	2295	0,706	2,56	1,416430595

Продолжение табл. П.2.20

$f, \text{Гц}$	$R_i, \text{Ом}$	$C_i, \text{мкФ}$	$f^2, \text{кГц}^2$	$1/C, \text{мкФ}^{-1}$
2000	2283	0,667	4,00	1,499250375
2400	2277	0,630	5,76	1,587301587
2800	2272	0,594	7,84	1,683501684
3200	2274	0,558	10,24	1,792114695

**П.2.21. Результаты измерения активного сопротивления и ёмкости
(0,6 м раствор NaCl, T = 298 К)**

$f, \text{Гц}$	$R_i, \text{Ом}$	$C_i, \text{мкФ}$	$f^2, \text{кГц}^2$	$1/C, \text{мкФ}^{-1}$
1200	2405	0,6670	1,44	1,49925037
1600	2403	0,6280	2,56	1,59235669
2000	2408	0,6029	4,00	1,65864986
2400	2405	0,5780	5,76	1,73010381
2800	2403	0,5435	7,84	1,83992640
3200	2400	0,5150	10,24	1,94174757

**П.2.22. Результаты измерения активного сопротивления и ёмкости
(0,6 м раствор NaCl, T = 303 К)**

$f, \text{Гц}$	$R_i, \text{Ом}$	$C_i, \text{мкФ}$	$f^2, \text{кГц}^2$	$1/C, \text{мкФ}^{-1}$
1200	2239	0,671	1,44	1,49031297

1600	2225	0,642	2,56	1,55763240
2000	2218	0,611	4,00	1,63666121
2400	2216	0,588	5,76	1,70068027
2800	2209	0,568	7,84	1,76056338
3200	2205	0,538	10,24	1,85873606

**П.2.23. Результаты измерения активного сопротивления и ёмкости
(0,6 т раствор NaCl, T = 308 К)**

$f, \text{Гц}$	$R_i, \text{Ом}$	$C_i, \text{мкФ}$	$f^2, \text{кГц}^2$	$1/C, \text{мкФ}^{-1}$
1200	2066	0,683	1,44	1,46412884
1600	2063	0,656	2,56	1,52439024
2000	2058	0,636	4,00	1,57232704
2400	2052	0,609	5,76	1,64203612
2800	2044	0,589	7,84	1,69779287
3200	2045	0,564	10,24	1,77304965

**П.2.24. Результаты измерения активного сопротивления и ёмкости
(0,6 т раствор NaCl, T = 313 К)**

$f, \text{Гц}$	$R_i, \text{Ом}$	$C_i, \text{мкФ}$	$f^2, \text{кГц}^2$	$1/C, \text{мкФ}^{-1}$
1200	1981	0,668	1,44	1,49700599
1600	1972	0,647	2,56	1,54559505
2000	1963	0,630	4,00	1,58730159
2400	1959	0,609	5,76	1,64203612
2800	1954	0,588	7,84	1,70068027
3200	1951	0,575	10,24	1,73913043

**П.2.25. Результаты измерения активного сопротивления и ёмкости
(0,7 т раствор NaCl, T = 298 К)**

$f, \text{Гц}$	$R_i, \text{Ом}$	$C_i, \text{мкФ}$	$f^2, \text{кГц}^2$	$1/C, \text{мкФ}^{-1}$
800	2023	0,700	0,64	1,42857143
1200	2020	0,665	1,44	1,5037594
1600	2005	0,637	2,56	1,56985871
2000	2001	0,615	4,00	1,62601626
2400	2002	0,590	5,76	1,69491525
2800	1996	0,565	7,84	1,76991150
3200	1993	0,540	10,24	1,85185185

**П.2.26. Результаты измерения активного сопротивления и ёмкости
(0,7 т раствор NaCl, T = 303 К)**

$f, \text{Гц}$	$R_i, \text{Ом}$	$C_i, \text{мкФ}$	$f^2, \text{кГц}^2$	$1/C, \text{мкФ}^{-1}$
800	1855	0,708	0,64	1,412429379
1200	1840	0,679	1,44	1,472754050
1600	1824	0,653	2,56	1,531393568
2000	1826	0,636	4,00	1,572327044
2400	1837	0,602	5,76	1,661129568
2800	1830	0,583	7,84	1,715265866
3200	1804	0,560	10,24	1,785714286

**П.2.27. Результаты измерения активного сопротивления и ёмкости
(0,7 т раствор NaCl, T = 308 К)**

$f, \text{Гц}$	$R_i, \text{Ом}$	$C_i, \text{мкФ}$	$f^2, \text{кГц}^2$	$1/C, \text{мкФ}^{-1}$
----------------	------------------	-------------------	---------------------	------------------------

800	1698	0,724	0,64	1,381215470
1200	1681	0,697	1,44	1,434720230
1600	1670	0,673	2,56	1,485884101
2000	1664	0,651	4,00	1,536098310
2400	1664	0,628	5,76	1,592356688
2800	1664	0,606	7,84	1,650165017
3200	1663	0,585	10,24	1,709401709

**П.2.28. Результаты измерения активного сопротивления и ёмкости
(0,8 м раствор NaCl, T = 298 К)**

f , Гц	R_i , Ом	C_i , мкФ	f^2 , кГц ²	$1/C$, мкФ ⁻¹
1200	1859	0,6620	1,44	1,5105749
1600	1857	0,6410	2,56	1,5600624
2000	1862	0,6240	4,00	1,6025641
2400	1857	0,6040	5,76	1,6556291
2800	1852	0,5805	7,84	1,7226529
3200	1854	0,5594	10,24	1,7876296

**П.2.29. Результаты измерения активного сопротивления и ёмкости
(0,8 м раствор NaCl, T = 303 К)**

f , Гц	R_i , Ом	C_i , мкФ	f^2 , кГц ²	$1/C$, мкФ ⁻¹
1200	1741	0,6720	1,44	1,4880952
1600	1734	0,6570	2,56	1,5220700
2000	1721	0,6400	4,00	1,5625000
2400	1717	0,6210	5,76	1,6103069
2800	1710	0,6040	7,84	1,6556291
3200	1708	0,5829	10,24	1,7155601

**П.2.30. Результаты измерения активного сопротивления и ёмкости
(0,8 м раствор NaCl, T = 308 К)**

f , Гц	R_i , Ом	C_i , мкФ	f^2 , кГц ²	$1/C$, мкФ ⁻¹
1200	1598	0,679	1,44	1,4727541
1600	1593	0,667	2,56	1,4992504
2000	1589	0,648	4,00	1,5432099
2400	1590	0,639	5,76	1,5649452
2800	1582	0,621	7,84	1,6103060
3200	1576	0,604	10,24	1,6556291

**П.2.31. Результаты измерения активного сопротивления и ёмкости
(0,8 м раствор NaCl, T = 313 К)**

f , Гц	R_i , Ом	C_i , мкФ	f^2 , кГц ²	$1/C$, мкФ ⁻¹
1200	1500	0,7050	1,44	1,4184397
1600	1493	0,6920	2,56	1,4450867
2000	1486	0,6846	4,00	1,4607070
2400	1483	0,6720	5,76	1,4880952
2800	1778	0,6560	7,84	1,5243902
3200	1475	0,6400	10,24	1,5625000

**П.2.32. Результаты измерения активного сопротивления и ёмкости
(0,9 м раствор NaCl, T = 298 К)**

$f, \text{Гц}$	$R_i, \text{Ом}$	$C_i, \text{мкФ}$	$f^2, \text{кГц}^2$	$1/C, \text{мкФ}^{-1}$
800	1718	0,701	0,64	1,42653352
1200	1665	0,675	1,44	1,48148148
1600	1665	0,670	2,56	1,49253731
2000	1700	0,638	4,00	1,56739812
2400	1695	0,615	5,76	1,62601626
2800	1692	0,600	7,84	1,66666667
3200	1693	0,572	10,24	1,74825175

**П.2.33. Результаты измерения активного сопротивления и ёмкости
(0,9 м раствор NaCl, T = 303 К)**

$f, \text{Гц}$	$R_i, \text{Ом}$	$C_i, \text{мкФ}$	$f^2, \text{кГц}^2$	$1/C, \text{мкФ}^{-1}$
800	1584	0,702	0,64	1,42450142
1200	1563	0,680	1,44	1,47058824
1600	1557	0,659	2,56	1,51745068
2000	1550	0,641	4,00	1,56006249
2400	1548	0,621	5,76	1,61030596
2800	1548	0,603	7,84	1,65837479
3200	1547	0,583	10,24	1,71526587

**П.2.34. Результаты измерения активного сопротивления и ёмкости
(0,9 м раствор NaCl, T = 308 К)**

$f, \text{Гц}$	$R_i, \text{Ом}$	$C_i, \text{мкФ}$	$f^2, \text{кГц}^2$	$1/C, \text{мкФ}^{-1}$
800	1471	0,715	0,64	1,39860149
1200	1430	0,689	1,44	1,45137881
1600	1444	0,673	2,56	1,48588419
2000	1440	0,652	4,00	1,53374233
2400	1430	0,633	5,76	1,57977883
2800	1426	0,615	7,84	1,62601626
3200	1419	0,599	10,24	1,66944908

**П.2.35. Результаты измерения активного сопротивления и ёмкости
(0,9 м раствор NaCl, T = 313 К)**

$f, \text{Гц}$	$R_i, \text{Ом}$	$C_i, \text{мкФ}$	$f^2, \text{кГц}^2$	$1/C, \text{мкФ}^{-1}$
800	1345	0,725	0,64	1,379310345
1200	1332	0,700	1,44	1,428571429
1600	1329	0,680	2,56	1,470588235
2000	1322	0,662	4,00	1,510574018
2400	1319	0,646	5,76	1,547987616
2800	1317	0,631	7,84	1,584786054
3200	1312	0,615	10,24	1,626016260

**П.2.36. Результаты измерения активного сопротивления и ёмкости
(1,0 м раствор NaCl, T = 298 К)**

$f, \text{Гц}$	$R_i, \text{Ом}$	$C_i, \text{мкФ}$	$f^2, \text{кГц}^2$	$1/C, \text{мкФ}^{-1}$
1200	1523	0,6780	1,44	1,47492625
1600	1524	0,6600	2,56	1,51515152
2000	1526	0,6433	4,00	1,55448469
2400	1520	0,6300	5,76	1,58730159
2800	1517	0,6112	7,84	1,63612565
3200	1519	0,5930	10,24	1,68634064

П.2.37. Результаты измерения активного сопротивления и ёмкости

(1,0 m раствор NaCl, T = 303 K)

$f, \text{Гц}$	$R_i, \text{Ом}$	$C_i, \text{мкФ}$	$f^2, \text{кГц}^2$	$1/C, \text{мкФ}^{-1}$
1200	1432	0,6794	1,44	1,47188696
1600	1419	0,6675	2,56	1,49812734
2000	1415	0,6560	4,00	1,52439024
2400	1410	0,6417	5,76	1,55836060
2800	1403	0,6269	7,84	1,59515074
3200	1400	0,6147	10,24	1,62680983

П.2.38. Результаты измерения активного сопротивления и ёмкости
(1,0 m раствор NaCl, T = 308 K)

$f, \text{Гц}$	$R_i, \text{Ом}$	$C_i, \text{мкФ}$	$f^2, \text{кГц}^2$	$1/C, \text{мкФ}^{-1}$
1200	1310	0,6890	1,44	1,45137881
1600	1305	0,6780	2,56	1,47492625
2000	1300	0,6682	4,00	1,49655792
2400	1297	0,6542	5,76	1,52858453
2800	1293	0,6410	7,84	1,56006240
3200	1288	0,6300	10,24	1,58730159

П.2.39. Результаты измерения активного сопротивления и ёмкости
(1,0 m раствор NaCl, T = 313 K)

$f, \text{Гц}$	$R_i, \text{Ом}$	$C_i, \text{мкФ}$	$f^2, \text{кГц}^2$	$1/C, \text{мкФ}^{-1}$
1200	1209	0,7034	1,44	1,42166619
1600	1201	0,6932	2,56	1,44258511
2000	1197	0,6833	4,00	1,46348602
2400	1194	0,6730	5,76	1,48588410
2800	1192	0,6620	7,84	1,51057402
3200	1188	0,6530	10,24	1,53139357

Приложение 3

ПЕРВАЯ ПРОГРАММА

(расчёт средних резонансных частот колебаний гидратированных ионов: концентрация в диапазоне 0,1...4 m, шаг 0,1 m; интервал температур 25...40 °C, шаг 1...5 °C)

```
void CFreqCalc::OnOK()
{
// TODO: Add extra validation here
//Activity coefficients
double GammaKCl_t[40] = {-1e-17,-2e-5,-2e-5,-2e-5,-4e-5,-3e-5,-4e-5,-3e-5,-4e-5,-1e-5,
-8e-6,-9e-6,-1e-5,-1e-5,-1e-5,-2e-5,-2e-5,-2e-5,-2e-5,-2e-5,
-2e-5,-2e-5,-2e-5,-3e-5,-3e-5,-3e-5,-3e-5,-3e-5,-3e-5,-3e-5,
-3e-5,-3e-5,-3e-5,-3e-5,-3e-5,-3e-5,-3e-5,-3e-5,-3e-5,-3e-5};
double GammaKCl_t[40] = {-0.0003,0.0011,0.0009,0.0011,0.0024,0.0019,0.0026,0.0018,0.0025,0.0006,
0.0005,0.0006,0.0008,0.0009,0.0010,0.0011,0.0012,0.0013,0.0014,0.0015,
0.0016,0.0017,0.0018,0.0018,0.0019,0.0019,0.0020,0.0020,0.0021,0.0021,
0.0021,0.0021,0.0022,0.0022,0.0022,0.0022,0.0021,0.0021,0.0021,0.0021};
double GammaKCl[40] = {0.7779,0.7030,0.6780,0.6510,0.6153,0.6097,0.5873,0.5908,0.5721,0.5955,
0.5913,0.5858,0.5807,0.5758,0.5712,0.5668,0.5627,0.5589,0.5554,0.5522,
0.5492,0.5465,0.5441,0.5419,0.5400,0.5384,0.5371,0.5360,0.5352,0.5347,
0.5345,0.5345,0.5348,0.5354,0.5362,0.5374,0.5388,0.5405,0.5424,0.5446};
double GammaNaCl_t[40] = {-2e-6,-5e-6,-7e-6,-8e-6,-8e-6,-9e-6,-1e-5,-1e-5,-1e-5,-1e-5,
-1e-5,-1e-5,-2e-5,-2e-5,-2e-5,-2e-5,-2e-5,-2e-5,-2e-5,-3e-5,
-3e-5,-3e-5,-3e-5,-3e-5,-3e-5,-3e-5,-3e-5,-3e-5,-3e-5,-3e-5,
-3e-5,-4e-5,-4e-5,-4e-5,-4e-5,-4e-5,-4e-5,-4e-5,-4e-5,-4e-5};
double GammaNaCl_t[40] = {0.0002,0.0001,0.0003,0.0004,0.0005,0.0006,0.0006,0.0007,0.0007,0.0007,
0.0010,0.0011,0.0013,0.0014,0.0015,0.0017,0.0018,0.0019,0.0020,0.0021,
0.0022,0.0023,0.0024,0.0025,0.0026,0.0026,0.0027,0.0028,0.0028,0.0029,
0.0029,0.0030,0.0030,0.0031,0.0031,0.0031,0.0032,0.0032,0.0032,0.0032};
double GammaNaCl[40] = {0.7799,0.7345,0.7092,0.6917,0.6785,0.6678,0.6590,0.6514,0.6447,0.6389,
0.6370,0.6351,0.6335,0.6324,0.6316,0.6312,0.6311,0.6315,0.6322,0.6334,
0.6349,0.6367,0.6390,0.6416,0.6446,0.6480,0.6518,0.6560,0.6605,0.6654,
0.6707,0.6764,0.6825,0.6889,0.6957,0.7029,0.7105,0.7185,0.7268,0.7356};
Dynamic viscosity coefficients
double ViscKCl_t[40] =
{0.0002,0.0002,0.0002,0.0002,0.0002,0.0002,0.0002,0.0002,0.0002,0.0002,
```

```

0.0002,0.0002,0.0002,0.0002,0.0002,0.0002,0.0002,0.0002,0.0002,0.0002,
0.0002,0.0002,0.0002,0.0002,0.0002,0.0002,0.0002,0.0002,0.0002,0.0002,
0.0002,0.0002,0.0002,0.0002,0.0002,0.0002,0.0002,0.0002,0.0002,0.0002};
double ViscKCl_t[40] = {-0.0331,-0.0328,-0.0324,-0.0322,-0.0317,-0.0314,
-0.0311,-0.0308,-0.0304,-0.0301,-0.0303,-0.0301,-0.0299,-0.0296,-0.0294,
-0.0292,-0.0290,-0.0288,-0.0286,-0.0284,-0.0282,-0.0280,-0.0278,-0.0276,
-0.0275,-0.0273,-0.0272,-0.0270,-0.0269,-0.0267,-0.0266,-0.0265,-0.0264,
-0.0263,-0.0262,-0.0261,-0.0260,-0.0259,-0.0258,-0.0257};
double ViscKCl[40] = {1.5692,1.5632,1.5553,1.5511,1.5428,1.5368,1.5314,1.5253,1.5192,1.5138,
1.5116,1.5071,1.5028,1.4987,1.4949,1.4913,1.4879,1.4847,1.4818,1.4791,
1.4766,1.4744,1.4724,1.4706,1.4691,1.4678,1.4667,1.4658,1.4652,1.4648,
1.4646,1.4647,1.4650,1.4655,1.4663,1.4673,1.4685,1.4699,1.4716,1.4735};
double ViscNaCl_t2[40] = {0.0003,0.0003,0.0003,0.0003,0.0003,0.0003,0.0003,0.0003,0.0003,0.0003,
0.0003,0.0003,0.0003,0.0003,0.0003,0.0003,0.0003,0.0003,0.0003,0.0003,
0.0003,0.0003,0.0003,0.0003,0.0003,0.0003,0.0003,0.0003,0.0003,0.0003,
0.0003,0.0003,0.0003,0.0003,0.0003,0.0003,0.0003,0.0003,0.0003,0.0003};
double ViscNaCl_t[40] = {-0.0342,-0.0342,-0.0343,-0.0343,-0.0344,
-0.0345,-0.0346,-0.0347,-0.0349,-0.0351,-0.0352,-0.0354,-0.0357,-0.0359,
-0.0361,-0.0364,-0.0367,-0.0370,-0.0373,-0.0377,-0.0380,-0.0384,-0.0388,
-0.0392,-0.0397,-0.0401,-0.0406,-0.0411,-0.0416,-0.0421,-0.0426,-0.0432,
-0.0438,-0.0443,-0.0450,-0.0456,-0.0462,-0.0469,-0.0476,-0.0483};
double ViscNaCl[40] = {1.5936,1.6015,1.6100,1.6192,1.6289,1.6392,1.6501,1.6616,1.6737,1.6864,
1.6997,1.7136,1.7280,1.7431,1.7587,1.7750,1.7918,1.8092,1.8272,1.8458,
1.8651,1.8848,1.9052,1.9262,1.9478,1.9699,1.9927,2.0161,2.0400,2.0645,
2.0897,2.1154,2.1417,2.1686,2.1961,2.2242,2.2529,2.2821,2.3120,2.3424};
Density
double DensKCl_t2[40] = {-6e-7, 2e-6, 1e-6, -1e-7, -1e-6, -3e-6, -4e-6, -5e-6,
-6e-6, -4e-6, -8e-6, -9e-6, -1e-5, -1e-5, -1e-5, -1e-5, -1e-5, -2e-5, -2e-5, -2e-5,
-2e-5, -2e-5, -2e-5, -2e-5, -2e-5, -2e-5, -2e-5, -2e-5, -2e-5, -2e-5,
-3e-5, -3e-5, -3e-5, -3e-5, -3e-5, -3e-5, -3e-5, -3e-5, -3e-5, -3e-5};
double DensKCl_t[40] = {-0.0003,-0.0005,-0.0004,-0.0003,-0.0003,-0.0002,
-0.0001,-0.00005,-0.00004,-0.0001,0.0002,0.0002,0.0003,0.0004,0.0004,
0.0005,0.0006,0.0006,0.0007,0.0007,0.0008,0.0008,0.0009,0.0009,0.0010,
0.0010,0.0011,0.0011,0.0012,0.0012,0.0012,0.0013,0.0013,0.0013,0.0014,
0.0014,0.0014,0.0015,0.0015,0.0015};
double DensKCl[40] = {1.0096,1.0180,1.0211,1.0242,1.0275,1.0305,1.0337,1.0369,1.0398,1.0469,
1.0462,1.0493,1.0524,1.0554,1.0585,1.0616,1.0647,1.0677,1.0708,1.0738,
1.0769,1.0799,1.0829,1.0860,1.0890,1.0920,1.0950,1.0980,1.1009,1.1039,
1.1069,1.1099,1.1128,1.1158,1.1187,1.1216,1.1246,1.1275,1.1304,1.1333};
double DensNaCl_t2[40] = { 1e-7,-7e-7,-2e-6,-2e-6,-3e-6,-4e-6,-4e-6,-5e-6,
-5e-6,-6e-6,-6e-6,-7e-6,-7e-6,-8e-6,-8e-6,-8e-6,-9e-6,-9e-6,-9e-6,-9e-6,
-9e-6,-9e-6,-9e-6,-9e-6,-9e-6,-9e-6,-9e-6,-9e-6,-8e-6,-8e-6,
-8e-6,-7e-6,-7e-6,-6e-6,-6e-6,-5e-6,-5e-6,-4e-6,-4e-6,-3e-6};
double DensNaCl_t[40] = {-0.0003,-0.0003,-0.0002,-0.0002,-0.0001,
-0.0001,-6e-5,-3e-5,7e-6,4e-5,7e-5,9e-5,0.0001,0.0001,0.0002,0.0002,
0.0002,0.0002,0.0002,0.0002,0.0002,0.0002,0.0002,0.0002,0.0002,0.0002,
0.0002,0.0002,0.0001,0.0001,9e-5, 7e-5, 4e-5, 7e-6, -3e-5, -6e-5,-0.0001,
-0.0001,-0.0002,-0.0002};
double DensNaCl[40] = {1.0073,1.0106,1.0139,1.0173,1.0206,1.0240,1.0274,1.0307,1.0341,1.0375,
1.0410,1.0444,1.0478,1.0513,1.0547,1.0582,1.0617,1.0651,1.0686,1.0721,
1.0756,1.0792,1.0827,1.0863,1.0898,1.0934,1.0969,1.1005,1.1041,1.1077,
1.1113,1.1150,1.1186,1.1222,1.1259,1.1296,1.1332,1.1369,1.1406,1.1443};
double Conc[40] = {0.1,0.2,0.3,0.4,0.5,0.6,0.7,0.8,0.9,1.0,
1.1,1.2,1.3,1.4,1.5,1.6,1.7,1.8,1.9,2.0,
2.1,2.2,2.3,2.4,2.5,2.6,2.7,2.8,2.9,3.0,
3.1,3.2,3.3,3.4,3.5,3.6,3.7,3.8,3.9,4.0};
int TempDelta,TempLow,TempUp,i;//,k;
double Mk,Ma,Fr,Gamma,Eta,Ro,LambdaPlus,LambdaMinus,Pi,T;
IsError = 0;
Pi = 3.1415926535897932384626433832795;
CString Str;
UpdateData(true);
UpdateData(false);
sscanf(LPCTSTR)m_TempDelta, _T("%dX"), &TempDelta);
sscanf(LPCTSTR)m_TempLow, _T("%dX"), &TempLow);
sscanf(LPCTSTR)m_TempUp, _T("%dX"), &TempUp);
//Checking input data
if((TempDelta >= 150) || (TempLow >= 150) ||(TempUp >= 150))

```



```

IsError = 1;
if((TempDelta < 0) || (TempLow < 0) || (TempUp < 0))
IsError = 1;
if(TempUp < TempLow)
IsError = 1;
if(!IsError)
{
CFile File;
CStdioFile *FileOut;
FileOut = new CStdioFile("C:\\111.txt", CFile::modeCreate);
FileOut->Close();
if (FileOut->Open((LPCTSTR)("C:\\111.txt"), CFile::modeWrite))
{
if(m_Solution.GetCurSel() == 0)
{
/Solution = KCl
Str.Format("Результаты расчетов (раствор KCl)\n\n");
FileOut->WriteString((LPCTSTR)Str);
Str.Format("C, моль/кг    T          Fr, Гц\n");
FileOut->WriteString((LPCTSTR)Str);
T = TempLow;
while(T <= TempUp)
{
for(i = 0; i <= 39; i++)
{
Gamma = SquareEquation(GammaKCl_t2[i],
GammaKCl_t[i], GammaKCl[i], T);
Mk = 0.039102 + 0.018015 *
sqrt(10.8 / (0.018015 * Gamma * Conc[i] * (10.8 + 7.96)));
Ma = 0.035453 + 0.018015 *
sqrt(7.96 / (0.018015 * Gamma * Conc[i] * (10.8 + 7.96)));
LambdaPlus = SquareEquation(0.0027, 1.2802, 40.221, T);
LambdaMinus = SquareEquation(0.0036, 1.3507, 40.628, T);
Ro = SquareEquation(DensKCl_t2[i], DensKCl_t[i], DensKCl[i], T);
Eta = SquareEquation(ViscKCl_t2[i], ViscKCl_t[i], ViscKCl[i], T);
Fr = (Ro/Eta) * 0.03162278 * sqrt((96484.56 * 96484.56 * Gamma *
Conc[i] * LambdaPlus) / (Pi * Ma * Mk * LambdaMinus));
Str.Format("%1.1f %1.0f %f\n", Conc[i], T, Fr);
FileOut->WriteString((LPCTSTR)Str);
}
T += TempDelta;
}
}
if(m_Solution.GetCurSel() == 1)
{
//Solution = NaCl
Str.Format("Результаты расчетов (раствор NaCl)\n\n");
FileOut->WriteString((LPCTSTR)Str);
Str.Format("C, моль/кг    T          Fr, Гц\n");
// Str.Format("Концентрация --- Температура --- Резонансная частота\n");
FileOut->WriteString((LPCTSTR)Str);
T = TempLow;
while(T <= TempUp)
{
for(i = 0; i <= 39; i++)
{
Gamma = SquareEquation(GammaNaCl_t2[i],
GammaNaCl_t[i], GammaNaCl[i], T);
Mk = 0.022991 + 0.018015 *
sqrt(14.7 / (0.018015 * Gamma * Conc[i] * (14.7 + 7.96)));
Ma = 0.035453 + 0.018015 *
sqrt(7.96 / (0.018015 * Gamma * Conc[i] * (14.7 + 7.96)));
LambdaPlus = SquareEquation(0.0024, 0.9607, 25.402, T);
LambdaMinus = SquareEquation(0.0036, 1.3507, 40.628, T);
Ro = SquareEquation(DensNaCl_t2[i], DensNaCl_t[i], DensNaCl[i], T);
Eta = SquareEquation(ViscNaCl_t2[i], ViscNaCl_t[i], ViscNaCl[i], T);
Fr = (Ro/Eta) * 0.03162278 * sqrt((96484.56 * 96484.56 * Gamma *
Conc[i] * LambdaPlus) / (Pi * Ma * Mk * LambdaMinus));
}
}
}
}
}

```

```

Str.Format("%1.1f      %1.0f      %f\n",Conc[i],T,Fr);
FileOut->WriteString((LPCTSTR)Str);
}
T += TempDelta;
}
}
FileOut->Close();
UpdateData(false);
}
CDialog::OnOK();
}
else
AfxMessageBox(_T("Проверьте правильность ввода исходных данных!"));
}

```

Приложение 4

ВТОРАЯ ПРОГРАММА (интервал 0,1...4 *m* через 0,01 *m*; и 1 °C)

ResFrecTemp.cpp

```

double CResFrecTemp::SquareEquation(double a,double b,double c,
double t)
{
return(a*t*t+b*t+c);
}
void CResFrecTemp::OnOK()
{
// TODO: Add extra validation here
//Resonance frequency, C = 0.1 - 1
//KCl
double FrKCl_C2_1 [16] = {-2045.3,-2148.5,-2255.9,-2367.7,-2484.1,
-2605.4,-2731.7,-2863.4,-3000.7,-3143.8,-3293,-3448.6,-3610.8,-3779.9,
-3956.1,-4139.6};
double FrKCl_C_1 [16] = {11350,11664,11986,12317,12656,13004,13361,
13727,14102,14486,14879,15281,15693,16114,16543,16982};
double FrKCl_1 [16] = {379.11,386.66,394.96,404.06,414.01,424.88,
436.75,449.67,463.73,479.01,495.6,513.6,533.12,554.25,577.12,601.86};
//NaCl
double FrNaCl_C2_1[16] = {-1834.6,-1869.3,-1903.8,-1937.9,-1971.6,
-2004.7,-2037.1,-2068.7,-2099.2,-2128.7,-2156.9,-2183.6,-2208.7,-2232.1,
-2253.6,-2273};
double FrNaCl_C_1 [16] = {9656.3,9853.6,10052,10250,10449,10647,
10845,11041,11235,11428,11617,11803,11985,12162,12334,12500};
double FrNaCl_1 [16] = {251.93,257.95,264.1,270.38,276.78,283.31,
289.94,296.66,303.48,310.38,317.33,324.34,331.38,338.43,345.47,352.48};
//Resonance frequency, C = 1 - 4
//KCl
double FrKCl_C2_2 [16] = {-218.5,-233.81,-249.54,-265.68,-282.19,
-299.04,-316.18,-333.57,-351.16,-368.88,-386.66,-404.43,-422.11,-439.59,
-456.79,-473.59};
double FrKCl_C_2 [16] = {8136.5,8308.7,8480.6,8651.6,8821.3,8989.2,
9154.9,9317.7,9477,9632.2,9782.6,9927.4,10066,10197,10320,10435};
double FrKCl_2 [16] = {2083.1,2162.7,2250,2345.4,2449.5,2562.8,
2686.1,2819.8,2964.5,3121.1,3290,3472,3667.6,3877.7,4102.8,4343.5};

```

```

//NaCl
double FrNaCl_C2_2[16] = {-165.21,-153.63,-140.04,-124.27,-106.13,
-85.394,-61.859,-35.292,-5.4489,27.923,65.09,106.33,151.92,202.15,
257.33,317.75};
double FrNaCl_C_2 [16] = 6733.5,6851.4,6965.5,7075.1,7179.5,7277.8,7369.3,7452.9,7527.8,
7592.8,7646.9,7688.7,7717.2,7730.9,7728.4,7708.4};
double FrNaCl_2 [16] = {1661.7,1704.1,1749.8,1799,1851.9,1909,
1970.5,2036.9,2108.6,2186.2,2270,2360.6,2458.8,2565,2680,2804.5};
float ConcUp,ConcLow,C,ResFreq;
int Temp,Index;
isError = 0;
CString Str;
UpdateData(true);
UpdateData(false);
scanf((LPCTSTR)m_ConcUp, _T("%gX"), &ConcUp);
scanf((LPCTSTR)m_ConcLow, _T("%gX"), &ConcLow);
scanf((LPCTSTR)m_Temp, _T("%dX"), &Temp);
//Checking input data
if((ConcLow > 4) || (ConcUp > 4) || (Temp > 40))
isError = 1;
if((ConcLow < 0.009) || (ConcUp < 0.009) || (Temp < 25))
isError = 1;
if(ConcUp < ConcLow)
isError = 1;
if(!IsError)
{
if(Temp == 25)
Index = 0;
if(Temp == 26)
Index = 1;
if(Temp == 27)
Index = 2;
if(Temp == 28)
Index = 3;
if(Temp == 29)
Index = 4;
if(Temp == 30)
Index = 5;
if(Temp == 31)
Index = 6;
if(Temp == 32)
Index = 7;
if(Temp == 33)
Index = 8;
if(Temp == 34)
Index = 9;
if(Temp == 35)
Index = 10;
if(Temp == 36)
Index = 11;
if(Temp == 37)
Index = 12;
if(Temp == 38)
Index = 13;
if(Temp == 39)
Index = 14;
if(Temp == 40)
Index = 15;
CStdioFile *FileOut;
FileOut = new CStdioFile("C:\\111.txt", CFile::modeCreate);
FileOut->Close();
if (FileOut->Open((LPCTSTR)("C:\\111.txt"), CFile::modeWrite))
{
if(m_Solution.GetCurSel() == 0)
{
//Solution = KCl
Str.Format("Результаты расчетов (раствор KCl)\n");
FileOut->WriteString((LPCTSTR)Str);
}
}
}

```

```

Str.Format("Температура %d градусов\n\n",Temp);
FileOut->WriteString((LPCTSTR)Str);
Str.Format("C, моль/кг Fr, Гц\n");
FileOut->WriteString((LPCTSTR)Str);
C = ConcLow;
while(C <= ConcUp)
{
if(C<=1)
ResFreq = SquareEquation(FrKCl_C2_1[Index],FrKCl_C_1[Index],
FrKCl_1[Index],C);
if(C>1)
ResFreq = SquareEquation(FrKCl_C2_2[Index],FrKCl_C_2[Index],
FrKCl_2[Index],C);
Str.Format("%1.2f %5.3f\n",C,ResFreq);
FileOut->WriteString((LPCTSTR)Str);
C += 0.01;
}
}
if(m_Solution.GetCurSel() == 1)
{
//Solution = NaCl
Str.Format("Результаты расчетов (раствор NaCl)\n");
FileOut->WriteString((LPCTSTR)Str);
Str.Format("Температура %d градусов\n\n",Temp);
FileOut->WriteString((LPCTSTR)Str);
Str.Format("C, моль/кг Fr, Гц\n");
FileOut->WriteString((LPCTSTR)Str);
C = ConcLow;
while(C <= ConcUp)
{
if(C<=1)
ResFreq = SquareEquation(FrNaCl_C2_1[Index],FrNaCl_C_1[Index],
FrNaCl_1[Index],C);
if(C>1)
ResFreq = SquareEquation(FrNaCl_C2_2[Index],FrNaCl_C_2[Index],
FrNaCl_2[Index],C);
Str.Format("%1.2f %5.3f\n",C,ResFreq);
FileOut->WriteString((LPCTSTR)Str);
C += 0.01;
}
}
FileOut->Close();
UpdateData(false);
}
CDialog::OnOK();
}
else
AfxMessageBox(_T("Проверьте правильность ввода исходных данных!"));
}

```

FreqCalc.cpp

```

double CFreqCalc::SquareEquation(double a,double b,double c, double t)
{
return(a*t*t+b*t+c);
}
void CFreqCalc::OnOK()
{
// TODO: Add extra validation here
//Activity coefficients
double GammaKCl_t[40] = {-1e-17,-2e-5,-2e-5,-2e-5,-4e-5,-3e-5,
-4e-5,-3e-5,-4e-5,-1e-5,-8e-6,-9e-6,-1e-5,-1e-5,-1e-5,-2e-5,-2e-5,-2e-5,
-2e-5,-2e-5,-2e-5,-2e-5,-3e-5,-3e-5,-3e-5,-3e-5,-3e-5,-3e-5,-3e-5,
-3e-5,-3e-5,-3e-5,-3e-5,-3e-5,-3e-5,-3e-5,-3e-5,-3e-5,-3e-5};
double GammaKCl_t[40] = {-0.0003,0.0011,0.0009,0.0011,0.0024,0.0019,
0.0026,0.0018,0.0025,0.0006,0.0005,0.0006,0.0008,0.0009,0.0010,0.0011,
0.0012,0.0013,0.0014,0.0015,0.0016,0.0017,0.0018,0.0018,0.0019,0.0019,
0.0020,0.0020,0.0021,0.0021,0.0021,0.0021,0.0022,0.0022,0.0022,0.0022,

```

```

0.0021,0.0021,0.0021,0.0021};
double GammaKCl[40] = {0.7779,0.7030,0.6780,0.6510,0.6153,0.6097,
0.5873,0.5908,0.5721,0.5955,0.5913,0.5858,0.5807,0.5758,0.5712,0.5668,
0.5627,0.5589,0.5554,0.5522,0.5492,0.5465,0.5441,0.5419,0.5400,0.5384,
0.5371,0.5360,0.5352,0.5347,0.5345,0.5345,0.5348,0.5354,0.5362,0.5374,
0.5388,0.5405,0.5424,0.5446};
double GammaNaCl_t2[40] = {-2e-6,-5e-6,-7e-6,-8e-6,-8e-6,-9e-6,-1e-5,
-1e-5,-1e-5,-1e-5,-1e-5,-2e-5,-2e-5,-2e-5,-2e-5,-2e-5,-2e-5,-2e-5,-3e-5,
-3e-5,-3e-5,-3e-5,-3e-5,-3e-5,-3e-5,-3e-5,-3e-5,-3e-5,-3e-5,-4e-5,-4e-5,
-4e-5,-4e-5,-4e-5,-4e-5,-4e-5,-4e-5};
double GammaNaCl_t[40] = {0.0002,0.0001,0.0003,0.0004,0.0005,0.0006,0.0006,0.0007,0.0007,0.0007,
0.0010,0.0011,0.0013,0.0014,0.0015,0.0017,0.0018,0.0019,0.0020,0.0021,
0.0022,0.0023,0.0024,0.0025,0.0026,0.0026,0.0027,0.0028,0.0028,0.0029,
0.0029,0.0030,0.0030,0.0031,0.0031,0.0031,0.0032,0.0032,0.0032,0.0032};
double GammaNaCl[40] = {0.7799,0.7345,0.7092,0.6917,0.6785,0.6678,0.6590,0.6514,0.6447,0.6389,
0.6370,0.6351,0.6335,0.6324,0.6316,0.6312,0.6311,0.6315,0.6322,0.6334,
0.6349,0.6367,0.6390,0.6416,0.6446,0.6480,0.6518,0.6560,0.6605,0.6654,
0.6707,0.6764,0.6825,0.6889,0.6957,0.7029,0.7105,0.7185,0.7268,0.7356};
//Dynamic viscosity coefficients
double ViscKCl_t2[40] = {0.0002,0.0002,0.0002,0.0002,0.0002,0.0002,0.0002,0.0002,0.0002,0.0002,
0.0002,0.0002,0.0002,0.0002,0.0002,0.0002,0.0002,0.0002,0.0002,0.0002,0.0002,
0.0002,0.0002,0.0002,0.0002,0.0002,0.0002,0.0002,0.0002,0.0002,0.0002,
0.0002,0.0002,0.0002,0.0002,0.0002,0.0002,0.0002,0.0002,0.0002,0.0002};
double ViscKCl_t[40] = {-0.0331,-0.0328,-0.0324,-0.0322,-0.0317,-0.0314,
-0.0311,-0.0308,-0.0304,-0.0301,0.0303,-0.0301,-0.0299,-0.0296,-0.0294,
-0.0292,-0.0290,-0.0288,-0.0286,-0.0284,-0.0282,-0.0280,-0.0278,-0.0276,
-0.0275,-0.0273,-0.0272,-0.0270,-0.0269,-0.0267,0.0266,-0.0265,-0.0264,
-0.0263,-0.0262,-0.0261,-0.0260,-0.0259,-0.0258,-0.0257};
double ViscKCl[40] = {1.5692,1.5632,1.5553,1.5511,1.5428,1.5368,1.5314,
1.5253,1.5192,1.5138,1.5116,1.5071,1.5028,1.4987,1.4949,1.4913,1.4879,1.4847,1.4818,1.4791,1.4766,1.4744,1.4724,1.4706,1.4691,
1.4678,1.4667,1.4658,1.4652,1.4648,1.4646,1.4647,1.4650,1.4655,1.4663,1.4673,1.4685,
1.4699,1.4716,1.4735};
double ViscNaCl_t2[40] = {0.0003,0.0003,0.0003,0.0003,0.0003,0.0003,
0.0003,0.0003,0.0003,0.0003,0.0003,0.0003,0.0003,0.0003,0.0003,0.0003,
0.0003,0.0003,0.0003,0.0003,0.0003,0.0003,0.0003,0.0003,0.0003,0.0003,
0.0003,0.0003,0.0003,0.0003,0.0003,0.0003,0.0003,0.0003,0.0003,0.0003,
0.0003,0.0004,0.0004,0.0004};
double ViscNaCl_t[40] = {-0.0342,-0.0342,-0.0343,-0.0343,-0.0344,
-0.0345,-0.0346,-0.0347,-0.0349,-0.0351,-0.0352,-0.0354,-0.0357,-0.0359,
-0.0361,-0.0364,-0.0367,-0.0370,-0.0373,-0.0377,-0.0380,-0.0384,-0.0388,
-0.0392,-0.0397,-0.0401,-0.0406,-0.0411,-0.0416,-0.0421,-0.0426,-0.0432,
-0.0438,-0.0443,-0.0450,-0.0456,-0.0462,-0.0469,-0.0476,-0.0483};
double ViscNaCl[40] = {1.5936,1.6015,1.6100,1.6192,1.6289,1.6392,
1.6501,1.6616,1.6737,1.6864,1.6997,1.7136,1.7280,1.7431,1.7587,1.7750,
1.7918,1.8092,1.8272,1.8458,1.8651,1.8848,1.9052,1.9262,1.9478,1.9699,
1.9927,2.0161,2.0400,2.0645,2.0897,2.1154,2.1417,2.1686,2.1961,2.2242,
2.2529,2.2821,2.3120,2.3424};
//Density
double DensKCl_t2[40] = {-6e-7, 2e-6, 1e-6,-1e-7,-1e-6,-3e-6,-4e-6,-5e-6,
-6e-6,-4e-6, -8e-6,-9e-6,-1e-5,-1e-5,-1e-5,-1e-5,-1e-5,-2e-5,-2e-5,-2e-5,
-2e-5,-2e-5,-2e-5,-2e-5,-2e-5,-2e-5,-2e-5,-2e-5,-2e-5,-2e-5,-3e-5,-3e-5,-3e-5,
-3e-5,-3e-5,-3e-5,-3e-5,-3e-5,-3e-5,-3e-5};
double DensKCl_t[40] = {-0.0003,-0.0005,-0.0004,-0.0003,-0.0003,-0.0002,
-0.0001,-0.00005,-0.00004,-0.0001,0.0002,0.0002,0.0003,0.0004,0.0004,
0.0005,0.0006,0.0006,0.0007,0.0007,0.0008,0.0008,0.0009,0.0009,0.0010,
0.0010,0.0011,0.0011,0.0012,0.0012,0.0012,0.0013,0.0013,0.0013,0.0014,
0.0014,0.0014,0.0015,0.0015,0.0015};
double DensKCl[40] = {1.0096,1.0180,1.0211,1.0242,1.0275,1.0305,
1.0337,1.0369,1.0398,1.0469,1.0462,1.0493,1.0524,1.0554,1.0585,1.0616,
1.0647,1.0677,1.0708,1.0738,1.0769,1.0799,1.0829,1.0860,1.0890,1.0920,
1.0950,1.0980,1.1009,1.1039,1.1069,1.1099,1.1128,1.1158,1.1187,1.1216,
1.1246,1.1275,1.1304,1.1333};
double DensNaCl_t2[40] = { 1e-7,-7e-7,-2e-6,-2e-6,-3e-6,-4e-6,-4e-6,
-5e-6,-5e-6,-6e-6,-6e-6,-7e-6,-7e-6,-8e-6,-8e-6,-8e-6,-9e-6,-9e-6,-9e-6,-9e-6,
-9e-6,-9e-6,-9e-6,-9e-6,-9e-6,-9e-6,-9e-6,-8e-6,-8e-6,-8e-6,-7e-6,-7e-6,
-6e-6,-6e-6,-5e-6,-5e-6,-4e-6,-4e-6,-3e-6};
double DensNaCl_t[40] = {-0.0003,-0.0003,-0.0002,-0.0002,-0.0001,
-0.0001,-6e-5,-03e-5,7e-6,4e-5,7e-5,9e-5,0.0001,0.0001,0.0002,0.0002,

```

```

0.0002,0.0002,0.0002,0.0002,0.0002,0.0002,0.0002,0.0002,0.0002,0.0002,
0.0002, 0.0002, 0.0001, 0.0001,9e-5,7e-5,4e-5,7e-6,-3e-5,-6e-5,-0.0001,
-0.0001,-0.0002,-0.0002};
double DensNaCl[40] = {1.0073,1.0106,1.0139,1.0173,1.0206,1.0240,
1.0274,1.0307,1.0341,1.0375,1.0410,1.0444,1.0478,1.0513,1.0547,1.0582,
1.0617,1.0651,1.0686,1.0721,1.0756,1.0792,1.0827,1.0863,1.0898,1.0934,
1.0969,1.1005,1.1041,1.1077,1.1113,1.1150,1.1186,1.1222,1.1259,1.1296,
1.1332,1.1369,1.1406,1.1443};
double Conc[40] = {0.1,0.2,0.3,0.4,0.5,0.6,0.7,0.8,0.9,1.0,1.1,1.2,1.3,1.4,1.5,
1.6,1.7,1.8,1.9,2.0,2.1,2.2,2.3,2.4,2.5,2.6,2.7,2.8,2.9,3.0,3.1,3.2,3.3,3.4,3.5,
3.6,3.7,3.8,3.9,4.0};
int TempDelta,TempLow,TempUp,i;//,k;
double Mk,Ma,Fr,Gamma,Eta,Ro,LambdaPlus,LambdaMinus,Pi,T;
isError = 0;
Pi = 3.1415926535897932384626433832795;
CString Str;
UpdateData(true);
UpdateData(false);
scanf((LPCTSTR)m_TempDelta, _T("%dX"), &TempDelta);
scanf((LPCTSTR)m_TempLow, _T("%dX"), &TempLow);
scanf((LPCTSTR)m_TempUp, _T("%dX"), &TempUp);
//Checking input data
if((TempDelta >= 150) || (TempLow >= 150) ||(TempUp >= 150))
isError = 1;
if((TempDelta < 0) || (TempLow < 0) ||(TempUp < 0))
isError = 1;
if(TempUp < TempLow)
isError = 1;
if(!IsError)
{
//CFile File;
CStdioFile *FileOut;
FileOut = new CStdioFile("C:\\111.txt", CFile::modeCreate);
FileOut->Close();
if (FileOut->Open((LPCTSTR)("C:\\111.txt"), CFile::modeWrite))
{
if(m_Solution.GetCurSel() == 0)
{
//Solution = KCl
Str.Format("Результаты расчетов (раствор KCl)\n");
FileOut->WriteString((LPCTSTR)Str);
Str.Format("C, моль/кг   T,C   Mk,кг/моль   Ma,кг/моль   Fr,Гц\n");
FileOut->WriteString((LPCTSTR)Str);
T = TempLow;
while(T <= TempUp)
{
for(i = 0;i <= 39;i ++)
{
Gamma = SquareEquation(GammaKCl_t2[i],GammaKCl_t[i],GammaKCl[i],T);
Mk = 0.039102+0.018015*sqrt(10.8/(0.018015*Gamma*Conc[i]*(10.8+7.96)));
Ma = 0.035453+0.018015*sqrt(7.96/(0.018015*Gamma*Conc[i]*(10.8+7.96)));
LambdaPlus = SquareEquation(0.0027,1.2802,40.221,T);
LambdaMinus = SquareEquation(0.0036,1.3507,40.628,T);
Ro = SquareEquation(DensKCl_t2[i],DensKCl_t[i],DensKCl[i],T);
Eta = SquareEquation(ViscKCl_t2[i],ViscKCl_t[i],ViscKCl[i],T);
Fr = (Ro/Eta)*0.03162278*sqrt((96484.56*96484.56*Gamma*Conc[i]*LambdaPlus)/(Pi*Ma*Mk*LambdaMinus));
Str.Format("%1.1f   %1.0f   %5.4f   %5.4f   %f\n",Conc[i],T,Mk,Ma,Fr);
FileOut->WriteString((LPCTSTR)Str);
}
T += TempDelta;
}
}
}
if(m_Solution.GetCurSel() == 1)
{
//Solution = NaCl
Str.Format("Результаты расчетов (раствор NaCl)\n\n");
FileOut->WriteString((LPCTSTR)Str);
Str.Format("C, моль/кг   T,C   Mk,кг/моль   Ma,кг/моль   Fr,Гц\n");

```

```

// Str.Format("Концентрация --- Температура --- Резонансная частота\n");
FileOut->WriteString((LPCTSTR)Str);
T = TempLow;
while(T <= TempUp)
{
for(i = 0; i <= 39; i++)
{
Gamma = SquareEquation(GammaNaCl_t2[i], GammaNaCl_t[i],
GammaNaCl[i], T);
Mk = 0.022991 + 0.018015 * sqrt(14.7 / (0.018015 * Gamma * Conc[i] * (14.7 + 7.96)));
Ma = 0.035453 + 0.018015 * sqrt(7.96 / (0.018015 * Gamma * Conc[i] * (14.7 + 7.96)));
LambdaPlus = SquareEquation(0.0024, 0.9607, 25.402, T);
LambdaMinus = SquareEquation(0.0036, 1.3507, 40.628, T);
Ro = SquareEquation(DensNaCl_t2[i], DensNaCl_t[i], DensNaCl[i], T);
Eta = SquareEquation(ViscNaCl_t2[i], ViscNaCl_t[i], ViscNaCl[i], T);
Fr = (Ro/Eta) * 0.03162278 * sqrt((96484.56 * 96484.56 * Gamma * Conc[i] *
LambdaPlus) / (Pi * Ma * Mk * LambdaMinus));
Str.Format("%1.1f      %1.0f      %5.4f      %5.4f      %f\n", Conc[i], T, Mk, Ma, Fr);
FileOut->WriteString((LPCTSTR)Str);
}
T += TempDelta;
}
}
FileOut->Close();
UpdateData(false);
}
CDialog::OnOK();
}
else
AfxMessageBox(_T("Проверьте правильность ввода исходных данных!"));
}

```

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
1. КОЛЕБАТЕЛЬНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ДВОЙНОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ СЛОЕ ПРИ НАЛОЖЕНИИ ПЕРЕМЕННОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА	5
2. МЕТОД РАЗДЕЛЬНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ РЕАКТИВНЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ ИМПЕДАНСА И РАСЧЕТА СРЕДНИХ РЕЗОНАНСНЫХ ЧАСТОТ КОЛЕБАНИЙ ГИДРАТИРОВАННЫХ ИОНОВ	15
2.1. Методика подготовки кондуктометрической ячейки к измерениям	15
2.2. Методика расчёта составляющих импеданса	16
2.3. Влияние площади поверхности электродов на точность определения реактивных составляющих импеданса	18
2.4. Обоснование выбора конструкции кондуктометриче- ской ячейки	23
3. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ И ТЕМПЕ- РАТУРЫ РАСТВОРОВ ЭЛЕКТРОЛИТОВ НА РЕАКТИВНЫЕ СОСТАВЛЯЮЩИЕ ЭЛЕКТРОДНОГО ИМПЕДАНСА И СРЕДНИЕ РЕЗОНАНСНЫЕ ЧАСТОТЫ КОЛЕБАНИЙ ГИДРАТИРОВАННЫХ ИОНОВ	35
3.1. Влияние концентрации и температуры растворов хло- рида калия на величины средней резонансной частоты колебаний гидратированных ионов и реактивные со- ставляющие импеданса	35
3.2. Влияние концентрации и температуры растворов хло- рида натрия на величину средней резонансной частоты колебаний гидратированных ионов и реактивных со- ставляющих импеданса	43
4. ПРОГРАММНО-АНАЛИТИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ РАСЧЁТА СРЕДНИХ РЕЗОНАНСНЫХ ЧАСТОТ КОЛЕБАНИЙ ГИДРАТИРОВАННЫХ ИОНОВ	53
4.1. Аналитический комплекс уравнений для расчета сред- них резонансных частот колебаний гидратированных ионов	53
4.2. Программный комплекс для расчета средних резонанс- ных частот колебаний гидратированных ионов	59
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	70
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	71
ПРИЛОЖЕНИЯ	72