

Особенности измерений и моделирования биосистем в фазовых пространствах состояний

В. М. ЕСЬКОВ, В. В. ЕСЬКОВ, О. Е. ФИЛАТОВА

НИИ биофизики и медицинской кибернетики при Сургутском государственном университете, Сургут, Россия, e-mail: firing.squad@mail.ru

Выделены пять специальных свойств биологических систем, которые требуют развития новых синергетических методов для изучения. Рассмотрена возможность построения некоторых квазиаттракторов биосистем в многомерном фазовом пространстве и оценки свойств биосистем на основе анализа параметров этих квазиаттракторов и использования трех постулатов компартментно-кластерной теории. Приведены некоторые биологические примеры.

Ключевые слова: вектор состояния организма человека, квазиаттрактор.

Five special properties of biological systems requiring the development of new synergetic study methods were emphasized. The construction possibility of certain quasiattractors of biosystems in multidimensional phase space and of biosystems properties assessment based on those quasiattractors parameters analysis and application on three compartment-cluster theory postulates were considered. Certain biological examples were presented.

Key words: human state vector, quasiattractor.

Конец XX и начало XXI века ознаменовались трансформацией детерминистско-стохастического подхода (ДСП) в изучении медико-биологических систем в новую теорию хаоса и синергетику (ТХС). Эта трансформация не только коснулась естественно-научных направлений, но и затронула мировоззрение, привела к смене парадигм. Сейчас речь идет именно о смене парадигм, в частности, о переходе к синергетической парадигме. Основа этой трансформации, по мнению С. П. Курдюмова [1], базируется на понимании сложности «человекомерных систем». Это не только организм человека, но и динамика человеческой цивилизации, биосферы Земли и, возможно, всей обозримой для нас Вселенной. К пониманию сложности таких систем и попыткам их описать и, главное, прогнозировать их будущее за последние два столетия подходило много ученых. Достаточно вспомнить работы А. А. Богданова, Л. фон Берталанфи, Н. Винера и других замечательных основоположников кибернетики, теории сложных систем, включая и работы В. И. Вернадского, который впервые декларировал необходимость синергетического подхода в изучении биосистем, биосферы Земли в целом. Основная сложность и малая эффективность в описании и прогнозировании биосистем в рамках традиционных подходов заключается в особых свойствах диагностируемых объектов. И только ТХС открыла некоторые новые перспективы в изучении (измерении и прогнозировании) сложных биосистем [2–4].

Особенности биосистем. Не останавливаясь подробно на всех особенностях «человекомерных систем» и, в частности, «биосистем», о которых авторы уже неоднократно писали, кратко отметим пять базовых свойств биологических динамических систем (БДС), понимание которых имеет принципиальное значение для разработки новых концепций при их изучении и построении моделей поведения. Эти свойства существенно отличают БДС от других систем, изучаемых в физике, химии или технике. Перечислим их:

1. БДС — это системы с компартментной и кластерной структурой, когда отдельная (условно!) единица — компарт-

мент — может состоять из одного элемента или целого множества, но при этом важна динамика поведения такого множества (компартамента или кластера — совокупности компарментов). Такой компартментно-кластерный подход (ККП) уже заложен в строении воды, когда она без всяких добавок и компонентов уже кластеризуется на макроуровне [5]. Но вода образует основу любой БДС, и сейчас требуется переосмысление значимости ККП для новой теории строения и свойств воды (и всех биосистем) путем перехода от термодинамики сплошных сред (с их уравнениями теплопроводности, диффузии и вязкости) к кластерной теории жидких сред, представленной в [5]. Кластерное строение воды требует новых методов и моделей измерений. При этом очевидно, что такие кластерные БДС являются сложными, иерархическими системами, и их придется описывать многокомпонентными векторами $x = (x_1, x_2, \dots, x_m)^T$ в m -мерном фазовом пространстве состояний (ФПС). На сегодняшний день для таких БДС уже имеются определенные теории, одну из которых последние 20 лет авторы неоднократно представляли [6, 7]. Синергетической особенностью ККП является требование системного синтеза, т. е. минимизации размерности фазового пространства, перехода от m к k , где $k \ll m$. Задача измерения параметров порядка для систем и минимизации размерности ФПС уже решалась одним из авторов для БДС, находящихся в квазистационарных состояниях, но в общем случае она крайне сложная [1, 6].

2. Очень неприятной особенностью БДС (и это начинается уже от кластеров обычной воды, как показано в [5]) является постоянное изменение структуры и связей, т. е. эти системы относятся к кластеру «glimmering system» — «мерцающим системам». Причем это «мерцание» касается не только изменения параметров вектора состояния системы, но и размерности ФПС, значимости x_i (например, сейчас эти x_i — параметры порядка, а чуть позже — уже нет, ими становятся другие). Работать с такими «мерцающими системами» очень сложно, для них нет аналогов в физике или химии, так как термин «флуктуация» в точных науках имеет уже укоренив-

шийся смысл, и можно только весьма условно его использовать для таких систем, т. е. говорить о их «биофлуктуациях». При этом нужно вкладывать в это понятие некоторый другой, биологический смысл (в смысле «glimmer»). Применение термина «биофлуктуация» говорит о постоянном изменении не только величин x_i , но и размерности m в ФПС, изменении параметров порядка и т. д. И что особенно неприятно в попытке проведения аналогии с физикой, так это отсутствие возможностей флуктуировать вблизи средних значений, т. е. распределение в некотором объеме ФПС (его будем в дальнейшем называть квазиаттрактором) может быть (и, как правило, бывает) равномерным (что отрицает статистический подход).

3. Такие сложные, «мерцающие» БДС обладают свойством эволюционировать. Имеется в виду микроэволюция человека (как пример одной из трех систем в ФПС от рождения до старости и смерти) или эволюция человечества (переход от традиционалистского типа к технологическому обществу и далее в знаниевое, синергетическое, постиндустриальное общество). Микро- или макроэволюции присущи любой БДС, и в этом еще одна сложность (как прогнозировать динамику и конечное состояние этой эволюции).

4. Все БДС обладают также свойством телеологичности. Возможно, в это понятие следует вкладывать другой смысл, чем это делал Л. фон Берталанфи, но некоторая конечная цель в динамике развития любой системы имеется. Например, для человека — это процесс накопления информации для себя и для человечества (если этот человек — ученый) или неизбежность смерти человека, а может быть и всего человечества (!?). Все это еще предстоит изучать, но эти свойства явно обозначаются в динамике любой БДС (в частности, и для функциональных систем организма).

5. Самое «экстравагантное» свойство БДС и тяжело воспринимаемое сторонниками детерминистско-стохастического подхода (ДСП) — это свойство выхода за пределы трех сигм (для распределения Гаусса попадание за эти границы имеет вероятность $P < 0,003$). Принципиально, что БДС, вся эволюция живого происходят за пределами трех сигм, т. е. имеются гигантские «биофлуктуации», отклонения от средних значений. Именно такие системы, в частности люди (гении), создают новые (тоже выходящие далеко за пределы устоявшихся границ) теории и подходы, новые направления в науке. Все биологические процессы, выходящие за грань трех сигм, должны регистрироваться, изучаться, измеряться, и для них необходимо строить модели в рамках новой ТХС.

При сложности и неоднозначности (сравнительно с физикой и химией) понятий и трактовок в изучении БДС, а также необходимости перехода от ДСП к ТХС в естествознании в целом и в медико-биологических науках в частности, возникает проблема разработки новых подходов к выполнению измерений таких систем и их моделированию. Один из вариантов решения указанной проблемы базируется на измерениях характера движения вектора состояния биосистемы (ВСБС) и, в частности, вектора состояния организма человека (ВСОЧ) в ФПС. В рамках этого подхода учитываются кластерность БДС (при помощи m -мерного вектора), свойства «мерцания», микроэволюция, телеологичность и огромный разброс параметров, которые, как было показано, могут нести существенную информацию о БДС, ее эволюции и конечном состоянии. Именно учет изменчивости (или вариабельности) параметров системы (вместо термина «флукту-

ации», принятого в физике, химии и технике) оказывается весьма информативным для построения моделей биосистем и сравнения различных состояний в медико-биологических исследованиях. Цель исследования — разработка формальных методов системного синтеза (идентификации параметров порядка) на базе анализа хаотической динамики поведения биосистем в m -мерном ФПС. Для достижения цели были решены следующие задачи:

обоснование особенностей поведения биосистем в ФПС; введение трех постулатов (предположений), выделяющих пять основных свойств БДС;

обоснование алгоритма расчета параметров квазиаттракторов, на основе которых строится алгоритм идентификации параметров порядка для БДС с хаотической динамикой поведения;

выполнение иллюстративных примеров, показывающих полезность применения предлагаемых алгоритмов.

Возможность количественной оценки свойств и параметров БДС. Для такой оценки введем ряд постулатов (предположений):

А. Любую БДС можно описать вектором состояния $x = (x_1, x_2, \dots, x_m)^T$ в m -мерном ФПС. Компонентами этого вектора могут быть любые переменные (параметры) кардиореспираторной системы (КРС), биохимические параметры крови, параметры различных физиологических и психофизиологических функций человека и т. д. Главное при этом, что существуют методы и приборы для их объективного измерения. Об этом уже было сказано в более ранних работах [1, 6], когда, например, строились и измерялись параметры моделей респираторных нейронных сетей (или других нейросетей) в рамках компартментно-кластерного подхода, где в качестве x_i была принята биоэлектрическая активность эфферентных нервов или мышц.

В. При наличии максимального набора x_i всегда можно минимизировать размерность ФПС, т. е. перейти от m к k , где $k < m$ (или $k \ll m$). Сейчас в институте такие процедуры разработаны для разных БДС. Эти процедуры позволяют минимизировать размерность фазового пространства и получить некоторую компактную модель исследуемой системы. Для этих целей используют три подхода: минимизацию размерности ФПС в рамках ККТБ, нейросетевые технологии и метод анализа параметров квазиаттракторов движения ВСОЧ в ФПС. Последний базируется на третьем постулате, но дает реальную оценку значимости x_i [6, 7].

С. Уровень изменчивости (интенсивность разброса ВСБС в ФПС как некий аналог флуктуациям в физике) параметров БДС (значений x_i) является информацией для оценки состояния биосистем и прогноза их перехода в другие состояния (другие области фазового пространства, замены параметров порядка, перехода в другие ФПС). Существенно, что уровень изменчивости БДС является измеряемой величиной и его можно длительно мониторировать, сравнивать для разных групп биосистем или для одной и той же биосистемы, но находящейся в разных функциональных состояниях [6, 7].

Основываясь на этих трех предположениях (постулатах) можно измерять параметры квазиаттракторов (КА) областей фазовых пространств, внутри которых происходит движение ВСБС. Причем здесь не отвергается существование реальных аттракторов движения ВСОЧ, но они принципиально недостижимы при измерениях. Постулируется некоторый аналог в измерении параметров этих реальных аттракторов

с теоремой Бернулли (законом больших чисел), т. е. если число опытов (повторов измерений) проводить неограниченно, то параметры КА будут приближаться к параметрам идеального аттрактора (как в статистике $P^*(A) \rightarrow P(A)$ при числе измерений $n \rightarrow \infty$). Но обозначенные выше пять свойств БДС накладывают принципиальные ограничения на недостижимость измерений параметров идеального аттрактора, так как нельзя удерживать БДС сколь угодно долго в приблизительно одинаковом состоянии (есть эволюция БДС, телеологически прописана ее смерть, она постоянно кардинально меняется — человек болеет, стареет, меняет образ жизни и т. д.). Поскольку число повторов n конечно и невелико, то приходится довольствоваться параметрами КА. Алгоритм их расчета содержит несколько действий, которые каждый раз выполняют при обработке данных, получаемых при измерениях x_i от группы биообъектов, находящихся приблизительно в одинаковом функциональном состоянии (условно одинаковое заболевание, одинаковые экологические условия, одинаковые физиотерапевтические воздействия и т. д.).

Алгоритм расчета параметров квазиаттракторов ВСОЧ.

Получаемые данные от одного или группы обследуемых путем повторов измерений в виде набора m блоков данных (компартиментов), где m — число измеряемых биологических признаков, переносят в виде точек в m -мерное ФПС, в котором, фиксируя крайние левые и правые значения параметров ВСОЧ по каждой координате x_i , образуют КА в виде m -мерного параллелепипеда, у которого определяют объем V_g , центр и показатель асимметрии. По этим трем величинам (абсолютно или относительно) выносят решение об эффективности оздоровления, сравнивая эти параметры до и после воздействия. Существенно, что каждая группа обследуемых образует некоторое «облако» в ФПС, которое имеет свои границы Δx_i по каждой из координат x_i ($i = 1, 2, \dots, m$). Эти границы Δx_i являются гранями m -мерного параллелепипеда в m -мерном фазовом пространстве, и каждая грань представляет уровень изменчивости (вариабельности) i -го параметра (диагностического признака) — компонента вектора x в ФПС. Общий объем этого параллелепипеда является объемом V_g некоторого КА, который для разных групп обследуемых имеет свои параметры до и после воздействия. К

этим параметрам относятся: объем квазиаттрактора V_g , координаты его центра C в ФПС, показатель асимметрии r .

Определяются или абсолютные ($\Delta V_g = V_g^2 - V_g^1$), где V_g^2 —

значения V_g после лечения и V_g^1 — до лечения) или относительные в процентах $((\Delta V_g / V_g^1) \cdot 100)$ значения этих пара-

метров. Если относительные изменения параметров КА превышают погрешность измерения диагностических признаков, то они уже считаются значимыми (во многих случаях они составляют от 5 или 10 % и более). Чем больше изменения этих трех обобщенных (интегративных) показателей, тем более эффективно проводится оздоровление.

Сравнительная демонстрация метода оценки состояния биосистем. Группа детей работников ОАО «Сургутнефтегаз» была вывезена из Сургута в санаторий на юг России (в Туапсе) для проведения лечебно-оздоровительных мероприятий. Половина детей из этой группы (около 140 чел.) были обследованы по параметрам КРС четыре раза: перед отъездом из Сургута, сразу после приезда в санаторий, перед отъездом из него и сразу после прибытия в Сургут. Все четыре группы измерений параметров КРС были обработаны для расчета объема V_g КА, координат центра и показателя асимметрии. Было установлено, что все параметры ВСОЧ для КРС в рамках статистических изменений не претерпели значимых различий (изменения статистически не достоверны). Однако изменения параметров V_g , x_c и r весьма существенны и свидетельствуют об эффективности лечебно-оздоровительных мероприятий, что обусловлено снижением уровня вариационных процессов (изменчивости) по компонентам вектора состояния организма обследуемой группы детей. Для диагностики состояния КРС использовали аппарат «Элокс-01С2». Полученные показатели КРС изучали при помощи вариационной пульсометрии, поскольку важную роль в адаптации организма к внешним воздействиям играют регуляторные механизмы вегетативной нервной системы (ВНС).

Вариабельность сердечного ритма изучали при помощи пульсоксиметра программы «ELOGRAPH» (Самара). Специальным фотооптическим датчиком в положении сидя в

Таблица 1

Динамика показателей кардиореспираторной системы детей весной 2007 г. по данным вариационной пульсометрии и оксиметрии ($X \pm SD$)

Показатели	Сургут (отъезд)	Туапсе (приезд)	Туапсе (отъезд)	Сургут (приезд)
SIM, усл. ед.	3,22 ± 3,1	4,25 ± 4,17	4,31 ± 3,8	2,93 ± 2,8
PAR, усл. ед.	14,0 ± 4,9	12,7 ± 5,5	12,1 ± 5,48*	14,5 ± 5,37
HR, уд/мин	87,0 ± 10,2	90,0 ± 11,2	89,3 ± 9,98	84,6 ± 10,1
INB, усл. ед.	46,6 ± 44,3	57,4 ± 53,5	62,8 ± 55,06	45,5 ± 45,3
SPO ₂ , отн. ед.	97,84 ± 0,78	97,89 ± 0,85	97,95 ± 0,81	97,77 ± 1,00
SDNN, мс	56,95 ± 20,5	49,8 ± 16,8*	48,1 ± 18,1*	59,3 ± 23,4

Примечания: SIM — параметры активности симпатического отдела ВНС; PAR — параметры активности парасимпатического отдела ВНС; HR — частота сердечных сокращений; INB — индекс напряжения Баевского; SPO₂ — степень насыщения крови кислородом; SDNN — стандартное отклонение кардиоинтервалов за 5 мин регистрации; * — уровень значимости $\alpha = 1 - \beta < 0,05$ по сравнению с этим показателем при отъезде из Сургута.

Таблица 3

Результаты обработки данных аттрактора параметров кардиореспираторной системы (после приезда из санатория)

Размерность фазового пространства $m=13$	
IntervalX1= 13.0	AsymmetryX1= 0.2744
IntervalX2= 24.0	AsymmetryX2= 0.0625
IntervalX3= 46.0	AsymmetryX3= 0.0525
IntervalX4= 222.0	AsymmetryX4= 0.3357
IntervalX5= 5.0	AsymmetryX5= 0.2533
IntervalX6= 12879	AsymmetryX6= 0.2449
IntervalX7= 16393	AsymmetryX7= 0.2804
IntervalX8= 13784	AsymmetryX8= 0.2746
IntervalX9= 35165	AsymmetryX9= 0.2330
IntervalX10= 62.0	AsymmetryX10= 0.0712
IntervalX11= 62.0	AsymmetryX11= 0.0712
IntervalX12= 5.82	AsymmetryX12= 0.2252
IntervalX13= 105.0	AsymmetryX13= 0.1448
General asymmetry value $rX = 10609,8$	
General V value : 3,83E+030	

течение 5 мин регистрировали мгновенные значения частоты сердечных сокращений (HR), а также насыщение гемоглобина крови кислородом (SPO_2). Для анализа variabilityности сердечного ритма методами временной обработки кардиоинтервалов рассчитывали показатели симпатической (SIM) и парасимпатической (PAR) ВНС, индекс напряжения Баевского (INB), а также стандартное отклонение нормальных RR-интервалов (SDNN).

Изучение параметров квазиаттракторов поведения ВСОЧ в различных условиях внешней среды проводили по созданной программе, обеспечивающей идентификацию параметров КА поведения вектора состояния биосистем в m -мерном фазовом пространстве, предназначенной для исследования систем с хаотической организацией. Проводили расчет координат граней, их длины $D_i = \Delta x_i$, объема m -мерного параллелепипеда V_g , ограничивающего КА, хаотического и статистического центров, а также показателя асимметрии стохастического и хаотического центров. Это давало возможность проследить изменение фазовых характеристик во времени и выяснить скорость изменения состояний системы. Показатели описательной статистики рассчитывали при помощи пакета статистических программ.

Представим сравнительные статистические обработанные характеристики параметров (координат) ВСОЧ испытуемых при выполнении четырех измерений (до отъезда, сразу после приезда в санаторий, перед отъездом из него и после возвращения в Сургут). Отметим, что статистические данные не дают достоверных различий изучаемых параметров ВСОЧ (табл. 1).

Для сравнения с результатами статистической обработки возьмем результаты анализа этих же данных в рамках ТХС, т. е. в рамках алгоритма расчета КА. В табл. 2, 3 приведены параметры квазиаттракторов ВСОЧ для обобщенной группы детей (мальчики и девочки) перед отъездом (табл. 2) и после возвращения в Сургут из санатория (табл. 3) по всем 13 координатам ВСОЧ, которые включали кроме шести представленных в табл. 1 и частотные характеристики ритмограмм (VLF, LF, HF, LF/HF и др.).

Таблица 2

Результаты обработки данных аттрактора параметров кардиореспираторной системы (перед отъездом в санаторий)

Размерность фазового пространства $m=13$	
IntervalX1= 19.0	AsymmetryX1= 0.3275
IntervalX2= 24.0	AsymmetryX2= 0.0417
IntervalX3= 83.0	AsymmetryX3= 0.1134
IntervalX4= 287.0	AsymmetryX4= 0.3602
IntervalX5= 62.0	AsymmetryX5= 0.4516
IntervalX6= 14539	AsymmetryX6= 0.3328
IntervalX7= 11533	AsymmetryX7= 0.2136
IntervalX8= 11540	AsymmetryX8= 0.2645
IntervalX9= 82237	AsymmetryX9= 0.3948
IntervalX10= 57.0	AsymmetryX10= 0.0132
IntervalX11= 60.0	AsymmetryX11= 0.0078
IntervalX12= 5.35	AsymmetryX12= 0.2524
IntervalX13= 96.0	AsymmetryX13= 0.0837
General asymmetry value $rX = 33057,2$	
General V value : 1,88E+032	

Наблюдаются существенные различия в параметрах квазиаттракторов ВСОЧ до отъезда в санаторий и после приезда из него. Так, объем тринадцатимерного параллелепипеда, внутри которого находится КА движения ВСОЧ, до отъезда составлял $V_g = 1,88 \cdot 10^{32}$, а после возвращения из санатория его объем уменьшился на два порядка и составил $V_g = 3,83 \cdot 10^{30}$. Показатель асимметрии r также изменился с 33057,2 до 10609,8 усл. ед. после приезда в Сургут. В табл. 2 и 3, кроме V_g и r , представлены все промежуточные расчеты Δx_i (Interval x_i) и показателей асимметрии (Asymmetry x_i).

По трем наиболее характерным координатам ВСОЧ (параметрам порядка), а именно: SPO_2 , SIM и PAR вегетативной нервной системы можно визуально представить внешний вид квазиаттракторов (в трехмерном пространстве признаков SIM, PAR, SPO_2). В целом отметим, что полученный анализ параметров квазиаттракторов поведения ВСОЧ более контрастен, чем традиционный анализ в рамках математической статистики.

Уменьшение размеров квазиаттракторов ВСОЧ после приезда (отдыха и лечения в санатории) свидетельствует о снижении уровня изменчивости (variabilityности), т. е. степени разброса параметров ВСОЧ в фазовом пространстве состояний для разных обследуемых групп детей. Отметим также, что расширение границ квазиаттракторов показывает, что некоторые дети входят в область патологии, которая вполне еще и не проявляется. Однако показатели кардиореспираторной системы уже сигнализируют о неудовлетворительной адаптации, отклонениях от нормы. Очевидно, что после приезда из санатория квазиаттрактор ВСОЧ сужается за счет нормализации всех функций организма для всей группы обследованных детей (именно дети с донозологическими формами выходят за пределы трех сигм и расширяют границы квазиаттракторов). Сейчас такой подход в измерениях используется как в медицине, так и в физиологии труда и спорта.

Л и т е р а т у р а

1. **Еськов В. М. и др.** Применение компьютерных технологий при измерении неустойчивости в стационарных режимах биологических динамических систем // Измерительная техника. 2006. № 1. С. 40—45, **Es'kov V. M. e. a.** Computer technologies in stability measurements on stationary states in dynamic biological systems // Measurement Techniques. 2006. V. 49. N 1. P. 59—65.
2. **Майнцер К.** Сложносистемное мышление: Материя, разум, человечество. Новый синтез / Под. ред. Г. Г. Малинецкого. М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2009.
3. **Хакен Г.** Принцип работы головного мозга. Per Se. М., 2001.

4. **Хадарцев А. А. и др.** Диверсификация результатов научных открытий в медицине и биологии. Т. 1. Тула: «Тульский полиграфист», 2009.

5. **Еськов В. М., Хадарцев А. А., Филатова О. Е.** Синергетика в клинической кибернетике. Ч. I. Теоретические основы системного синтеза и исследований хаоса в биомедицинских системах / Под ред. А. И. Григорьева. Самара: ООО «Офорт», 2006.

6. **Еськов В. М., Хадарцев А. А., Филатова О. Е.** Синергетика в клинической кибернетике. Ч. II. Особенности саногенеза и патогенеза в условиях Ханты-Мансийского автономного округа — Югры. Самара: ООО «Офорт», 2007.

Дата принятия 06.07.2010 г.

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

681.382

Применение кулонометрических электролитических ячеек в гигрометрах абсолютной влажности

В. П. ПИРОГ, А. М. ГАБА, И. А. РУДЫХ, А. К. СЕМЧЕВСКИЙ

ООО «НПП ОКБА», Ангарск, Россия, e-mail: mail@okba.ru

Представлены материалы исследований кулонометрических электролитических ячеек с платиновыми, родиевыми и платино-родиевыми электродами. Описаны экспериментальная установка, методика и результаты исследования зависимости погрешности измерений при анализе инертных газов, азота, водорода и кислорода при температурах 20 и 50 °С. Даны рекомендации по использованию кулонометрических электролитических ячеек в гигрометрах с диапазоном измерений 0—1000 млн⁻¹.

Ключевые слова: гигрометр, инертные газы, азот, водород, кислород.

The materials of research of coulometric electrolytic cells with platinum, rhodium and platinum-iridium electrodes are presented. The experimental installation, method and results of measurements error study for inert gases and nitrogen, hydrogen and oxygen analysis at temperatures 20 and 50 °C are described. The recommendations on coulometric from 0 to 1000 ppm are given.

Key words: hygrometer, inert gases, nitrogen, hydrogen, oxygen.

Влажность инертных газов, азота, кислорода и водорода — один из главных параметров технологии производства продуктов разделения воздуха, криогенной техники и научных исследований. Этот параметр играет существенную роль при обеспечении качества и технических характеристик научно-исследовательских, технических и промышленных процессов. При анализе влажности технологических, чистых и особочистых газов абсолютная влажность, наряду с другими характеристиками, определяет потребительские свойства газов. Для измерения массовой концентрации или объемной доли влаги используют кулонометрические гигрометры [1], основными достоинствами которых являются измерение малых и ультрамалых значений абсолютной влажности, возможность измерения влажности различных газовых смесей,

малые расходы анализируемого газа, простота использования.

Кулонометрический метод измерения. В качестве первичного преобразователя применяют кулонометрическую электролитическую ячейку (КЭЯ), состоящую из двух частей — рабочей и контрольной, расположенных во внутреннем канале стеклянного корпуса, трех проволочных геликоидальных электродов, один из которых является общим, а два других расположены между витками общего электрода с зазором между витками.

Пленкой сорбента служит пленка частично гидратированного фосфорного ангидрида P_2O_5 . К электродам через выводы на наружной поверхности корпуса подводится электрическое напряжение постоянного тока.