

9. Коркин-Бонден Э. Основы ферментативной кинетики. М., 1979.
10. Ляпунов А. А., Багриновская Г. П. Математическое моделирование в биологии. М., 1975.
11. Месарович М. Теория систем и биология. М., 1971.
12. Моисеев П. Н. Число и мысль. 5, М., 1982.
13. Молчанов А. М. Всесторонний анализ окружающей среды. М., 1976.
14. Ратнер В. А. Молекулярно-генетические системы управления. Новосибирск, 1975.
15. Родин С. Н., Миркин Б. Г. Моделирование биологических систем. ч. II, Новосибирск, 1976.
16. Свирижев Ю. М. Математические модели в экологии. М., 1982.
17. Ханин М. А., Бухаров И. Б., Носов А. С. ДАН СССР 201, 728, 1971.
18. Atkins G. L. J. Theor. Biol., 32, 421, 1971.
19. Bernstein F. C., Koetzie T. F. Arch. Biochem. Biophys., 85, 584, 1978.
20. Dayhoff M. O. Atlas of Protein Sequence and Structure. 5, Washington, 1972.
21. Ekblad B. M., Licko V. Amer. J. Physiology, 15, R114, 1984.
22. Koushanpour E., Silpp C. K. J. Theor. Biol., 99, 203, 1982.
23. Murchuk G. J. Proc of 8 conf. on opt. tech. 41, Heidelberg, 1978.
24. Mărgineanu I., Ghetie V. J. Theor. Biol., 90, 101, 1981.
25. Michaelis N., Menten M. J. Biochem. Z., 9, 333, 1913.
26. Nossila B. Metabolism of Human Gammaglobulin., 115, Oxford, 1964.

«Биолог. ж. Армении», т. XXXIX, № 2, 1986

УДК 612.816+617.758.1

ГИДРОМЕХАНИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ УСТАНОВКИ И ДВИЖЕНИЙ ГЛАЗА (СТАТИКА И ДИНАМИКА ПЛАВАЮЩЕГО ГЛАЗА)*

В. Р. ГАЛОЯН

Впервые рассмотрено глазное яблоко как плавающее тело, создана логическая и физическая модель плавающего глаза. Исследована физическая модель при различных пространственных ориентациях. На основании результатов анализа и сравнения анатомического строения глаза-глазницы с техническими и биологическими аналогами показана состоятельность модели. Проведена экспериментальная проверка модели на интактном и энуклированном глазе. Разработана теория плавучести глаза по аналогии с привлечением теории свободного плавания тел. Показано, что при нормальном положении глаза в орбите, помимо основных сил плавания—силы тяжести и подъемной силы,—на яблоко глаза действует выталкивающая сила и противоположно ей направленная сила отрицательного давления. Впервые определены центр тяжести глаза и центр величины и показано, что посадка глаза в орбите в норме неустойчива. Проанализированы статистическое и динамическое равновесие состояния глаза в зависимости от ориентации головы и туловища в пространстве. Обсуждаются правомерность, новизна и состоятельность модели.

Ключевые слова: модель гидромеханическая, глазное яблоко, центр тяжести глазного яблока.

Глаз в процессе зрительного акта совершает ряд функционально необходимых движений, сочетающихся с теми или иными движениями головы, туловища—при установке позы, движения, связанные с ходь-

* Начальные этапы работы выполнены в лаборатории передачи информации в органах чувств Института проблем передачи информации АН СССР

бой, и такие движения, которые совершаются при открывании и закрывании век. Если первые служат для правильной установки глаза в орбитах, то функция вторых не совсем ясна. Однако между этими движениями существует взаимопределяющая связь. В настоящее время экспериментально регистрируются почти все виды движений глаз и накоплен большой фактический материал о работе глазодвигательного аппарата [4, 10, 11, 18, 19].

Во всех работах, посвященных изучению глаза как механической системы, развивается единственная теория движений, согласно которой все движения глаза относительно глазницы сводятся к его вращению вокруг центра вращения под действием крутящих моментов, создаваемых тремя парами глазодвигательных мышц. Однако в них не учитывается влияние межканальной жидкости телорной капсулы, в которой помещен глаз, на его установку и движения. Искются лишь единичные исследования, в которых приводятся данные о влиянии интраорбитальных образований (зрительного нерва, кровеносных сосудов, конъюнктивы) и пассивной упругости мышц на движения глаза [20, 21].

В то же время не существует модели, удовлетворительно объясняющей механизмы моторики с охватом всех движений глаза.

Нами разработана модель плавающего глаза, которая лежит в основе гидромеханической модели установки и глазных движений.

Глаз—глазница как кинематическая шаровая пара. Глаз в процессе зрительного акта находится в непрерывном движении относительно глазницы, и систему глаз—глазница можно рассматривать как кинематическую шаровую пару. Как и во всех механических движениях, так и при взаимном вращении глаза—глазницы действуют силы трения, противодействующие движению. Поскольку в процессе зрительного акта глаз совершает быстрые и точные движения, что возможно только при минимальном рассеянии энергии, то можно заключить, что между глазом и глазницей—слой высокоэффективной смазки. Наилучшей считается жидкостная или гидродинамическая смазка. Например, при больших скоростях вращения подшипника при наличии гидродинамической смазки его шарики находятся в состоянии плавления [14]. В системе глаз—глазница режим гидродинамической смазки не возникает. Приведенный же пример показывает, как высокоэффективная смазка переводит вращающуюся деталь в состояние плавления.

Техническим аналогом системы глаз—глазница может служить гидростатический подшипник, конструктивно напоминающий шаровидный сустав, в котором трущиеся поверхности разделены толстым слоем смазки [17]. Как и в случае гидродинамической смазки, подвижная часть гидростатического подшипника, благодаря наличию жидкой смазки, находится в состоянии плавления. Отметим также, что при наличии смазки трущиеся поверхности при слабом давлении разделены толстым слоем смазки. Ввиду малого веса яблоко глаза может оказывать лишь слабое давление. Значит, оно разделено от трущейся поверхности толстым слоем смазки. С другой стороны, известно, что при разделении двух коаксиальных сферических поверхностей слоем жидкости внутренняя сфера будет находиться в состоянии плавления. На

этом основан принцип вискозиметрии—метода измерения вязкости жидкости [2].

Анатомические предпосылки и подтверждающие феномены. С механической точки зрения глаз представляет собой шарообразное тело (сферу) и не имеет ни центра подвеса, ни постоянной оси вращения [8].

Глазное яблоко от места выхода зрительного нерва и до роговой оболочки окружено теноновой капсулой, представляющей собой плотную соединительнотканную пластину, переходящую в области соединения с роговицей в тоненькую эластичную пленку, не мешающую движениям глаза. Между глазным яблоком и теноновой капсулой имеется щель—так называемое теноново пространство, заполненное межтеноновой жидкостью. В теноновой капсуле глазное яблоко свободно вращается, как в суставной сумке, подобно тому, как это происходит в шаровом суставе [9].

Анатомия глаза-глазницы выявляет сходство с рассмотренными выше гидростатическим подшипником и коаксиальными сферами вискозиметра. Это дает основание утверждать, что глаз в глазнице находится в состоянии плавания. В то же время не видно других анатомических признаков, препятствующих этому. Действительно, хотя и имеются связанные с яблоком глаза анатомические образования—зрительный нерв, кровеносные сосуды, мышцы,—ими можно пренебречь. Так, например, зрительный нерв входит в орбиту вместе с глазничной артерией и на пути к глазу образует S-образный изгиб, что позволяет глазу свободно двигаться, не натягивая нерва [10]. Глазодвигательные мышцы на большом протяжении располагаются вне теноновой капсулы, прободают ее у экватора и крепятся к яблоку глаза: прямые—недалеко от лимба, косые—в задних квадрантах. Кроме того, для работы глазодвигательных мышц характерны реципрокность, что создает условия лишь для вращения, и отсутствие рефлекса натягивания—прижимания глаза к задней поверхности капсулы. Поэтому глазодвигательные мышцы могут оказывать влияние лишь на кренящие плавательные движения глаза, не выводя его из состояния плавания. Действительно, положение глазного яблока в орбите весьма свободное. Например, глаз смещается вперед и возвращается в исходное положение в зависимости от степени раскрытия глазной щели, от вдоха и выдоха, пульсовых толчков, от наклона или запрокидывания головы. Перемещения эти происходят в пределах 1—2 мм [9]. Эти движения есть ни что иное, как всплытие и погружение (изменение степени погружения) глаза в жидкость теноновой капсулы.

Важным соображением в пользу идеи плавания глаза служит то, что глаз является частью мозга, вынесенной на периферию, следовательно, он должен находиться во взвешенном состоянии наподобие головного и спинного мозга в амортизирующей жидкости [6].

Наконец, идею плавания глаза предваряет определение движений глаз («плавающие») у больных, находящихся в коматозном состоянии [18].

Экспериментальные наблюдения. Экспериментальные наблюдения проводились в двух сериях опытов: на нативном, целостном глазе и изолированном глазном яблоке.

Для наблюдения плавания нативного глаза достаточно снять активные усилия глазодвигательных мышц, что имеет место при закрытии век и расслаблении зрительного внимания. С другой стороны, известно, что при поднимании (размыкании) век глаза совершают установочное движение и, наоборот, при опускании (закрывании) они «улыбаются» вбок [12]. Наблюдения за этими движениями глаза при различных ориентациях головы в пространстве делают наглядным плавание глаза.

Наблюдения проводились в следующих условиях. Испытуемый, двумя пальцами зажимая ресницы у угла глазной щели, поддерживал один глаз закрытым, а второй периодически закрывал и открывал. При этом четко были видны движения роговицы под веком закрытого глаза. На расстоянии двух метров во фронтальной полости испытуемый фиксировал светящуюся точку.

В положении сидя при закрывании открытого глаза яблоко закрытого глаза перемещалось вниз, при открывании—двигалось снизу вверх. Соответственно, когда испытуемый лежал на левом боку, при закрывании правого открытого глаза яблоко закрытого левого глаза перемещалось темпорально, т. е. кнаружи, иначе говоря—вниз. В этом же положении при закрывании левого глаза яблоко правого закрытого глаза перемещалось к носу, т. е. опять вниз по гравитационной вертикали. Аналогичную картину наблюдали и при положении лежа на правом боку, только перемещения происходили как для правого, так и левого глаза в противоположных направлениях, т. е. опять же вниз по гравитационной вертикали. В положении лицом вниз яблоко глаза при закрывании и открывании оставалось неподвижным. Как видим, эти движения имеют гравитационную природу и характерны для плавающих тел.

Во второй серии опытов наблюдения проводились на изолированном яблоке глаза в состоянии свободного плавания.

Использовались свежеэуклинированные глаза трупов новорожденных. Когда в сосуд с дистиллированной водой помещалось глазное яблоко, оно незамедлительно опускалось на дно. Затем в жидкость добавляли поваренную соль, и, точно регулируя концентрацию соли в жидкости, мы добивались всплытия яблока глаза на поверхность (рис. 1). При этом удельный вес жидкости оказывался равным $1,050 \text{ г/см}^3$, что приблизительно равно удельному весу крови— $1,056 \text{ г/см}^3$ [3]. Этот опыт был повторен с жидкой кровью, содержащей гепарин, без добавления соли. В этом случае яблоко глаза находилось в состоянии плавания у поверхности жидкости. Вес глаза был равен 2,8 г, объем— $2,7 \text{ см}^3$, отношение веса глаза к его объему составляло $1,037 \text{ г/см}^3$. Такого же порядка величину имеет отношение веса глаза взрослого человека к объему глаза. Средний вес яблока глаза человека равен 8,2 г, объем— $7,8 \text{ см}^3$ [1]; отношение равно $1,051 \text{ г/см}^3$.

Отметим, что до настоящего времени состав межтканевой жидкости, заполняющей теломовое пространство, не исследован. Возможно,

она содержит белки, липиды и другие соединения, но все же основную ее долю должна составлять плазма. В литературе теоретиче-



Рис 1. Свободное плавание яблока глаза. Два изолированных яблока глаза трупа новорожденных находятся в состоянии свободного плавания в жидкости с удельной плотностью порядка удельной плотности крови. Статически равновесным состоянием является посадка глаза зрачком горизонтально

ство называют плазматическим, тем самым подчеркивая плазматическую природу заполняющей жидкости. Это позволяет нам за удельную плотность межтканевой жидкости принять плотность плазмы (крови). Сопоставление удельного веса заполняющей жидкости (1,056) и удельного веса глаза (1,051) показывает, что в системе глаз—глазница с большой точностью соблюдены физические условия плавания. Как видим, модель плавающего глаза вполне правдоподобна.

Физическая модель плавающего глаза. Проверкой модели и дальнейшим ее развитием является построение и исследование действующей физической модели. С этой целью нами была изготовлена механическая модель плавающего глаза, состоящая из двух коаксиальных сфер (полусфер) с зазором между ними, заполненным водой (рис. 2). Внутренняя сфера заполнялась парафином и с целью создания условий для плавания ее вес доводился до требуемой величины, с тем расчетом, чтобы часть сферы выступала из отверстия внешней сферы. Затем тонкой резиновой пленкой герметически закрывалось отверстие—зазор между сферами так, что при опрокидывании сфер отверстием вниз жидкость не выливалась. Пленка склеивалась со сферами таким образом, чтобы влияние на состояние плавания внутренней сферы было очень слабым. При правильном изготовлении модели внутренняя сфера «свободно» плавает, не тонет, не прижимается к краям отверстия внешней



сферы, не задевает внутренних стенок ее. При надавливании и снятии давления внутренняя сфера погружается и всплывает или совершает крен и возвращается в исходное положение.



Рис. 2 Физическая модель плавающего глаза. Вход модели направлен вниз, и внутренняя сфера, моделирующая яблоко глаза, плавает «зрачком» (верхом) вниз.

Состояние плавания внутренней сферы сохранялось при всевозможных пространственных ориентациях модели, в том числе и при опрокидывании модели отверстием вниз, т. е. тело плавало верхом вниз. Это имеет существенное значение, поскольку показывает, что и глаз находится в состоянии плавания независимо от ориентации головы и туловища в пространстве.

Теория модели плавающего глаза. Плавание глаза в отличие от свободного происходит в ограниченном объеме замкнутого сосуда, из которого глаз выступает наружу, а края входа капсулы замыкаются на яблоке глаза в области лимба. Кроме того, «свободная» поверхность жидкости—вход капсулы—изменяет свою ориентацию в пространстве. Причем состояние плавания глаза сохраняется при всевозможных ориентациях головы в пространстве, в том числе и зрачком вниз. Подобное явление не может иметь места при свободном плавании, и это нуждается в объяснении. В то же время плавание глаза при горизонтальном положении входа капсулы мало отличается от свободного, и к нему применимы законы последнего.

Законы плавания характеризуют плавучесть тела в состоянии как статического, так и динамического равновесия. Приложение этих законов к глазу для логической последовательности необходимо начать с рассмотрения статического равновесия, которое устанавливается под действием основных сил плавания: тяжести глаза и подъемной силы.

Согласно первому условию плавания [13], вес яблока глаза уравновешен подъемной силой, равной весу межтканевой жидкости в объе-

ма погруженной части яблока глаза. Так как глаз выступает из жидкости (теноновой капсулы), то удельный вес яблока глаза α меньше удельного веса жидкости теноновой капсулы γ :

$$\alpha < \gamma \quad (1)$$

Неравенство (1) подтверждается приведенными выше экспериментальными данными, где $\alpha = 1,051 \text{ г/см}^3$, а $\gamma = 1,056 \text{ г/см}^3$. Таким образом, первое условие плавания глаза выполняется, и, согласно этому условию, часть глаза должна выступать из жидкости, т. е. теноновой капсулы.

Сформулируем второе условие: чтобы глаз плавал при данной посадке, центр тяжести (ЦТ) и центр величины (ЦВ) (центр подъемной силы) его должны находиться на одной гравитационной вертикали. При этом глаз будет обладать устойчивостью при условии, что ЦВ расположен выше ЦТ. Если это условие не удовлетворяется, то глаз придет в состояние равновесия при другой посадке. Если же ЦВ расположен ниже ЦТ возможны два случая: устойчивый и неустойчивый. Для анализа определим ЦТ и ЦВ глаза и их взаимное расположение.

1. *Определение центра тяжести глаза.* Глаз в соответствии с его формой имеет две плоскости симметрии: горизонтально-поперечную и продольно-вертикальную [5]. В глазе можно выделить отдельные однородные области. Это передняя камера, хрусталик и стекловидное тело. Согласно определению [7], ЦТ этих областей должны лежать на линии пересечения плоскостей симметрии, т. е. на геометрической, или оптической оси глаза. В качестве базового примем глазное яблоко с усредненными параметрами: весом—8,2 г, объемом—7,8 см³. Форму глаза примем шаровой, тогда ЦТ передней и задней областей определяется известными формулами [7].

$$L_1 = \frac{3}{4} \frac{(2r - h)^2}{3r - h}, \quad (2)$$

$$L_2 = \frac{h}{4} \left(\frac{4r - h}{3r - h} \right), \quad (3)$$

где L_1 и L_2 —расстояния от геометрического центра глаза до ЦТ соответственно передней и задней областей глаза; h —высота передней области (шарового сегмента), она складывается из толщины хрусталика (4,6 мм), глубины передней камеры (3,6 мм) и толщины роговицы (0,8 мм); r —радиус яблока глаза [1].

Для r имеем:

$$r = \sqrt[3]{\frac{3V}{4\pi}} \approx 12,3 \text{ мм}, \quad (4)$$

где V —объем глаза.

Подставив значения h и r в выражения (2) и (3), получим:

$$L_1 = 6,55 \text{ мм},$$

$$L_2 = 3,24 \text{ мм},$$

Найдем вес передней области:

$$P_1 = V_{\text{сегм}} \cdot \gamma_{\text{ср}} \quad (5)$$

где $V_{\text{сегм}} = \pi h^2 \left(r - \frac{1}{3} h \right)$ — объем передней области; $\gamma_{\text{ср}}$ — средний удельный вес заполняющей переднюю область массы.

Очевидно, в переднюю область кроме указанных элементов войдет и часть стекловидного тела, прилегающая к задней поверхности хрусталика. Удельный вес водяной влаги камер равен $1,0037 \text{ г/см}^3$, соответственно хрусталика — $1,00 \text{ г/см}^3$, а за удельный вес стекловидного тела вместе с роговой оболочкой примем средний удельный вес глаза — $1,051 \text{ г/см}^3$ [1]. Тогда получим: $\gamma_{\text{ср}} = 1,0182 \text{ г/см}^3$.

Подставив значения $V_{\text{сегм}}$ и $\gamma_{\text{ср}}$ в уравнение (5), получим $P_1 = 2,41 \text{ г}$. Вес задней области определяется: $P_2 = 8,2 \text{ г} - 2,41 \text{ г} = 5,79 \text{ г}$.

Очевидно, ЦТ глаза определится как точка равновесия между передней и задней областями, имеющими соответственно веса — P_1 и P_2 , приложенные к концам стержня длиной $L_{\text{сг}} + L_{\text{сз}}$.

Составим пропорцию

$$\frac{L_{\text{сг}} + L_{\text{сз}} - x}{x} = \frac{2,41}{5,79}.$$

Отсюда

$$x = \frac{9,79 \cdot 5,79}{8,2} = 6,91 \text{ мм}.$$

Следовательно, ЦТ глаза расположен позади геометрического центра на расстоянии $X - 6,55 = 0,36 \text{ мм}$.

2. *Определение центра величины и поверхности центров величины.* Согласно определению [15], ЦВ глаза есть ЦТ тела однородной плотности в объеме глаза, погруженного в межтканевую жидкость. Погруженный объем отсекается по плоскости плавания, а ЦВ определим по формуле (3), где $L_{\text{сг}}$ — расстояние от геометрического центра яблока глаза до ЦВ; r — радиус яблока глаза; h — высота отсекаемого от глаза шарового сегмента, т. е. расстояние от вершины роговицы до плоскости плавания. За плоскость плавания глаза следует принять плоскость, отстоящую от лимба на расстоянии 4—5 мм, где заканчивается тенонова щель [9] (рис. 3).

Для h можно записать $h = h_1 + h_2$,

где h_1 — расстояние от вершины роговицы до плоскости, проходящей через лимб; h_2 — расстояние от плоскости лимба до плоскости плавания.

Известно, что поверхность роговицы составляет $1/6$ поверхности глаза. Запишем:

$$2\pi r h_1 = \frac{1}{6} 4\pi r^2,$$

где r — радиус глаза.

Отсюда

$$h_1 = \frac{1}{3} r = 4,1 \text{ мм}.$$

h_2 определим из прямоугольного треугольника ABC (рис. 3), у которого гипотенузой служит расстояние от лимба до плоскости плавания,

равное 4—5 мм. Из этого следует, что h_2 меняется в интервале $3,2 \div 4$ мм и соответственно $h = 7,3 \div 8,1$ мм, а $L_c = 2,6 \div 2,9$ мм. Заключаем, что ЦВ отстоит от вершины роговицы на расстоянии $14,9 \div 15,2$ мм.

Таким образом, ЦВ расположен ниже ЦГ глаза. В этом случае равновесное состояние глаза является неустойчивым, если при крене его по часовой стрелке ЦВ расположится левее направления силы тяжести, и устойчивым, если ЦВ расположится правее [16]. Для анализа необходимо определить поверхность ЦВ глаза—геометрического места точек ЦВ погруженных частей при всевозможных посадках глаза. Можно сказать, что поверхностью ЦВ глаза служит концентрическая поверхность, подобная поверхности яблока глаза [16]. Так как реальное яблоко глаза имеет форму эллипсоида с осями, из которых передне-задняя больше поперечной и вертикальной, то соответственно и поверхность ЦВ имеет форму эллипсоида.

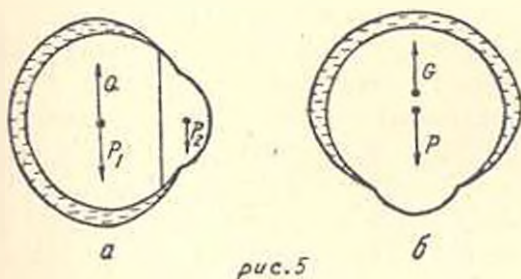
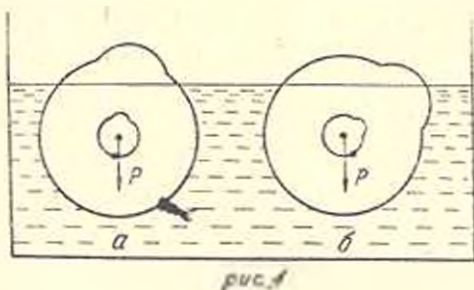
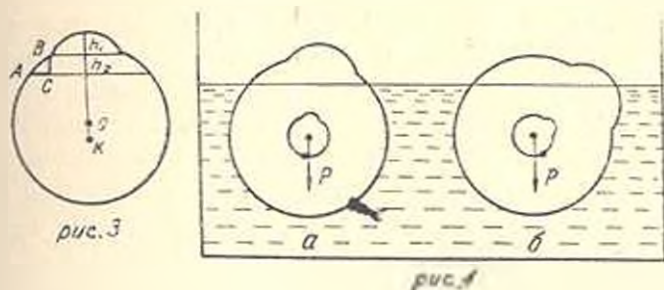


Рис. 3. Схематическое изображение яблока глаза (объяснение в тексте).

Рис. 4. Схема, демонстрирующая: а—неустойчивое, б—устойчивое состояние яблока глаза при свободном плавании.

Рис. 5. Схематическое изображение яблока глаза, погруженного в жидкость геновой капсулы: а—при вертикальной ориентации головы, б—при положении лицом вниз.

3. *Равновесие плавущего глаза.* Из рис. 4 а видно, что равновесное состояние глаза при посадке зрачком вверх по отношению к свободной поверхности жидкости является неустойчивым, так как при крене по часовой стрелке ЦВ расположится левее направления силы тяжести. Очевидно, что равновесным состоянием является посадка глаза зрачком горизонтально, так как в этом случае при крене по часовой стрелке (рис. 4 б) форма погруженной части изменится и будет несимметричной, в результате ЦВ сместится вправо от силы тяжести. Этот факт подтверждается экспериментально на изолированном глазном яб-

леке (рис. 1). Из рисунка видно, что статически устойчивым равновесным состоянием свободно плавающего изолированного глаза является его посадка зрачком горизонтально. В орбите же глаз имеет посадку зрачком вверх по отношению к «свободной» поверхности межтканевой жидкости (входа в теноновую капсулу). Следовательно, при ориентации головы лицом вверх на глаз действует кренящий момент сил тяжести глаза и подъемной силы.

Неустойчивое состояние глаза становится еще более явным при вертикальном положении головы, т. е. при нормальном положении глаза. В этом случае подъемная сила уравнивает лишь часть тяжести яблока глаза, которая погружена в жидкость. Из рис. 5а видно, что сила тяжести выступающей из капсулы части глаза не оказывает давления на жидкость и не может быть уравновешена подъемной силой. Вследствие этого уменьшается степень погружения глаза в жидкость, и глаз незначительно смещается кнаружи, т. е. имеет место выталкивание глаза кнаружи. Кроме того, ЦВ и ЦТ уравновешенной (погруженной) части яблока глаза лежат в одной точке. Следовательно, моменты сил тяжести погруженной части глаза и подъемной силы равны нулю. Неустойчивое состояние глаза в этом случае создается неуравновешенной силой тяжести передней, выступающей из капсулы части глаза. Аналогично рассмотренному случаю глаз неуравновешен и при ориентациях туловища вниз головой и лежа на боку. И лишь при ориентации головы лицом вниз (рис. 5б) глаз будет находиться в статически равновесном состоянии. Действительно, в этом случае ЦВ расположен выше ЦТ глаза, и тяжесть глаза уравновешена подъемной силой. Таким образом, при открытых веках глаз как плавающее тело находится в неустойчивом состоянии при всевозможных ориентациях головы и туловища в пространстве, кроме ориентации лицом вниз.

Равновесие плавающего глаза называется динамически устойчивым, если кренящая сила компенсируется противостоящей внешней силой. Внешними силами для плавающего глаза являются силы глазодвигательных мышц. Например, в нормальном первичном положении глаза компенсирующей силой является действие мышц-поднимателей, так как кренящий момент в этом случае вращает глаз вокруг его поперечной оси. Очевидно, для любого (вторичного, третичного) положения глаза и ориентации головы и тела в пространстве можно найти сочетание действия внешних глазодвигательных мышц, компенсирующих кренящие силы и поддерживающих глаз в динамическом равновесии. Таким образом, глаз в покое при любом стоянии в орбите находится в состоянии динамического равновесия под действием сил гидростатических, с одной стороны, и противоположно направленных сил мышц—с другой.

В отличие от динамического равновесия при открытых веках равновесие глаза при закрытых веках является статически устойчивым, и кренящие силы уравновешены пассивной упругостью глазодвигательных мышц. А глаз пребывает в орбите в положении, определяемом ориентацией головы в пространстве.

Плавание глаза зрачком вниз аналогично плаванию листа бумаги, покрывающей стакан, заполненный доверху водой и опрокинутый, кор-

да вытеканию воды из стакана противостоит отрицательное давление. Подтверждение найдем на физической модели плавающего глаза.

В герметически закрытой щели между сферами, заполненной водой, при опрессовывании модели входом вниз внутренняя сфера (яблоко глаза) незначительно сместится вниз, тогда наверху (на дне внешней сферы) образуется небольшой вакуум, и возникшее отрицательное давление будет препятствовать дальнейшему смещению яблока глаза вниз. Таким образом, существенных изменений в состоянии плавания внутренней сферы не происходит (сфера по-прежнему окружена жидкостью), и глаз может плавать зрачком вниз. Этому же способствует эластичный вход теноновой капсулы, замыкающийся на яблоке глаза.

Предложенная модель плавающего глаза основана на одном из самых оптимальных и рациональных способов организации движений — плавании тел. Плавание глаза происходит в замкнутом сосуде с выступающей из сосуда частью, герметически закрывающей его вход. На первый взгляд состояние плавания глаза неочевидно, из-за наличия системы глазодвигательных мышц, однако здесь можно провести аналогию с прищвартованным кораблем, который тем не менее находится в состоянии плавания. В модели действие глазодвигательных мышц следует рассматривать как внешние силы, приложенные к яблоку глаза как к плавающему телу.

Модель плавающего глаза имеет множество аналогов как в биологических системах, так и в технике, убедительно подтверждающих, что глаз и глазнице находится в состоянии плавания. Построенная же действующая механическая модель показала, что глаз находится в состоянии плавания при всевозможных ориентациях головы и туловища в пространстве, в том числе и зрачком вниз, что уже выходит за область теории свободного плавания.

Экспериментальная проверка как на интактном, так и на изолированном яблоке глаза показала правомерность модели.

Разработанная теория модели плавающего глаза основана на теории свободного плавания тел. Первое и основное условие плавания глаза обеспечивается тем, что удельный вес яблока глаза $\alpha = 1,051 \text{ г/см}^3$ и меньше удельного веса плазмы крови $\gamma = 1,056 \text{ г/см}^3$. И что обуславливает состояние плавания с выступающей над поверхностью жидкости частью (роговицей), т. е. над входом теноновой капсулы. Значения α и γ соответствуют средним статистическим величинам, приводимым в литературе, и имеют высокую достоверность.

С высокой точностью по известным методам расчета определены также ЦП и ЦВ яблока глаза, что имеет существенное значение для анализа второго условия плавания. В результате анализа взаимного расположения ЦП и ЦВ глаза при различных ориентациях головы в пространстве была выявлена неустойчивость посадки глаза в орбите и предсказано движение глаза вниз при закрывании век, что хорошо согласуется с экспериментальными наблюдениями. Движения глаза вниз по гравитационной вертикали наблюдались также при положении испытуемого лежа на боку, и то время как при положении лицом вниз глаз не совершал движений. И это вполне согласуется со вторым условием

плавания, так как в последнем случае ЦВ находится выше ЦТ глаза, и кренящий момент сил равен нулю (рис. 5). Эти результаты позволяют сделать важный вывод: при закрытых глазах яблоко глаза находится в состоянии статического равновесия, и глазодвигательные мышцы расслаблены.

Глаз выводится из статически равновесного состояния уже при совершении установленного движения и при дальнейшем выполнении зрительных функций пребывает в динамически равновесном состоянии плавания под действием внешних сил—работы глазодвигательных мышц.

Плавание глаза отличается от свободного также изменением ориентации «свободной» поверхности жидкости в пространстве и связанным с этим возникновением сил выталкивания и отрицательного давления.

Основное достоинство модели состоит в том, что в ней учитывается реакция среды—гидростатические и гидродинамические силы, действующие на яблоко глаза, что является качественно новым подходом к системе глаз—глазница и механике глаза. Предсказания модели не вызывают сомнений, причем часть из них подтверждается старыми данными.

Результаты опытов—модель плавающего глаза—позволяют сделать ряд важных выводов.

Глаз, помещенный в жидкость теноновой капсулы, находится в состоянии плавания независимо от ориентации головы и туловища в пространстве.

Глаз не может оказывать давления на стенки капсулы из-за уравновешения силы тяжести. Следовательно, между яблоком глаза и теноновой капсулой должно существовать щелевое пространство, что подтверждается морфологически.

Глаз способен к репозиции и выстоянию—погружению и всплытию в зависимости от степени раскрытия глазной щели, опускания и поднятия головы, вдоха и выдоха, пульсовых толчков, что наблюдается на практике.

Действие глазодвигательных мышц—суть вращательные моменты внешних сил, приложенных к яблоку глаза как к плавающему телу. Они не могут вывести глаз из состояния плавания и влияют лишь на кренящие плавательные движения.

Движения глаза подчиняются законам гидромеханики плавающих тел: в организации установки и движений глаза, кроме сил глазодвигательных мышц, учитываются и гидромеханические силы.

Силы трения, возникающие при движениях глаза, определяются условиями жидкостной смазки и ничтожно малы, что хорошо согласуется с экспериментальными данными.

При закрытых веках глазодвигательные мышцы расслаблены, и глаз находится в статически равновесном положении, определяемом ориентацией головы в пространстве под действием гидростатических сил—с одной стороны, и пассивной упругостью глазодвигательных мышц—с другой.

При открывании век глазодвигательные мышцы активизируются, и глаз из статически равновесного положения переходит в динамическое равновесие—совершает установочное движение.

При открытых веках и различных ориентациях головы в пространстве, кроме лицом вниз, положение глаза является статически неустойчивым, и на яблоко глаза действует крекаящая сила.

Глаз при любом вторичном и третичном стояниях в орбите находится в состоянии динамического равновесия под действием сил гидростатических—с одной стороны, и противоположно направленными сил глазодвигательных мышц—с другой.

Необычное состояние плавания глаза зрачком вниз, а физической модели верхом вниз объясняется возникновением отрицательного давления и рывками эластичного входа капсулы, препятствующих смещению глаза вниз и способствующих сохранению состояния плавания.

Институт биохимии АН Армянской ССР

Поступило 18.XII.1987

ԱՋԳԻ ԿԵՆՏՐՈՆԱՅՄԱՆ ԵՎ ՇԱՐԺՄԱՆ ՀԻՖՐՈՄԵԿԱՆԻԿԱԿԱՆ ՄՈԴԵԼԸ (ԼՈՂԱՅՈՂ ԱՋԳԻ ՍՏԱՏԻԿԱՆ ԵՎ ԴԻՆԱՄԻԿԱՆ)

Վ. Ռ. ԳԱԼՈՅԱՆ

Առաջին անգամ բննարկված է աչքի խնձորը որպես լողացող մարմին, ստեղծված է լողացող աչքի տրամաբանական և ֆիզիկական մոդելը: Կատարված են ֆիզիկական մոդելի ուսումնասիրություններ տարբեր տարածական կողմնորոշումների պայմաններում: Անալիզի ենթարկելով և համեմատելով աչք-ակնախոռոչի անատոմիական կառուցվածքը տեխնիկական և կենսաբանական համեմատանների հետ՝ ցույց է տրված մոդելի հիմնավոր լինելը: Կատարված է մոդելի փորձնական ուսուցում ինտակտ և էնուկլեինացված աչքերի վրա: Մշակված է աչքի լողման տեսությունը՝ համեմատանությամբ և մարմինների ազատ լողման տեսությունը կիրառելով: Ցույց է տրված, որ ակնակապիճում աչքի նորմալ դիրքի վերաբերյալ, լողման հիմնական ուժերի (ծանրության և վերամբարձ) առկայությամբ, աչքի խնձորի վրա ազդում է արտամերդման ուժը և նրան հակառակ ուղղված բացասական ճնշման ուժը: Առաջին անգամ որոշված է աչքի ծանրության կենտրոնը: Ցույց է տրված, որ նորմալում ակնակապիճում աչքի տեղադրումը հաստատուն չէ: Անալիզի է ենթարկված աչքի ստատիկ և դինամիկ հավասարակշռության վիճակը՝ կախված տարածության մեջ գլխի և մարմնի կողմնորոշումից: Քննարկված են մոդելի օրինաչափականությունը, նոր և հիմնավոր լինելը, բերված են եզրակացություններ և կանխազուշակումներ:

HYDROMECHANICAL MODEL OF FIXING AND EYE MOVEMENTS (STATICS AND DYNAMICS OF SWIMMING EYE)

V. R. GALOYAN

The eyeball is looked upon as a swimming mass for the first time. A logical and physical model of the swimming eye is created. The re-

searches of physical model are made at different space orientations. By analysing and comparing the anatomic construction of the eye and its orbital cavities with technical and biological analogues the reality of the model is shown. Some phenomena, experimental testing of the model on intact and enucleated eye testify it. The theory of eye swimming is worked out according to analogy and to the theory of free swimming of masses. It is shown that at normal state of eye in its orbital cavity, besides the main swimming force, that is the force of gravity and lifting force, the expulsive force influences the eyeball, as well as the negative pressing force, directed against it. For the first time the centre of gravity and the centre of buoyancy are defined and it is shown that the settling of the eye in its orbital cavity is not stable. The static and dynamic station of the eye is analysed depending on head and body state in the space. The reality of model, its modernity, conclusions and hypothesis are discussed.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Аветисов Э. С. Охрана зрения детей, М., 1975.
2. Белкин И. М. Ротационные приборы, М., 1968.
3. БМЭ, 14, вып. 2, М., 1960.
4. Галоян В. Р. Автореф. канд. дисс., М., 1979.
5. Дашевский А. И. Новые методы изучения оптической системы глаза и развитие его рефракции, Киев, 1950.
6. Катц Б. Нерв, мышцы и синус, М., 1968.
7. Лисовский Л. И. Центр тяжести твердого тела, Л., 1961.
8. Матюшкин Д. И. Глазодвигательный аппарат млекопитающих, Л., 1963.
9. Меркулов И. И. Клиническая офтальмология, Харьков, 1966.
10. Меркулов И. И. Вопросы нейроофтальмологии, 5, 5, 131, Харьков, 1960.
11. Миграни Я. Саккадические движения глаз и зрение, БАН, София, 1973.
12. Многотомное руководство по глазным болезням, 3, М., 1962.
13. Осипов П. Е. Гидравлика и гидравлические машины, М., 1965.
14. Петров П. П. Гидродинамическая теория смазки, М., 1948.
15. Потрашев А. И. Гидромеханика, М., 1953.
16. Хаскин М. Д. Гидродинамическая теория качки корабля, М., 1973.
17. Черноусов Н. П. Гидростатический подшипник, Л., 1963.
18. Шахнович А. Р. Мозг и регуляция движений глаз, М., 1974.
19. Ярбус А. Л. Роль движений глаз в процессе зрения, М., 1965.
20. Robinson D. A. Amer. J. Physiol., 25, 548, 1969.
21. Thomas T. G. Kybernetik, 3, 254, 1967.