

УДК 531/534: [57+61]

КИНЕМАТИЧЕСКИЕ И ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ УСТАНОВИВШЕГОСЯ НЕСТАЦИОНАРНОГО ДВИЖЕНИЯ ЭЛИТНЫХ ПЛОВЦОВ

С.В. Колмогоров

Поморский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Россия, 163006, Архангельск, проспект Ломоносова, 4, e-mail: kolmogorov@pomorsu.ru

Аннотация. На основе продолжительных исследований создан биогиродинамический метод, который используется для анализа технической подготовленности элитных пловцов женского и мужского пола. Этот метод позволил количественно определить реальные внутрицикловые значения тотальной и эффективной продвигающих сил, генерируемых движителями пловца. Внутрицикловые изменения мгновенной поступательной скорости, равной скорости центра масс тела человека, взаимосвязаны с определенными фазами цикла движений и объясняются разницей мгновенных значений эффективной продвигающей силы ($F_{p(e.)}(t)$) и силы лобового гидродинамического сопротивления ($F_{r(f.d.)}(t)$). У элитных пловцов зарегистрированы высокие значения коэффициента пропульсивной эффективности ($e_p = 0,626–0,837$).

Ключевые слова: плавание, активное гидродинамическое сопротивление, механическая мощность, пропульсивная эффективность.

ВВЕДЕНИЕ

Биомеханические исследования водных локомоций человека показывают, что наиболее сложным и принципиальным является изучение причин возникновения на поверхности тела человека движущей силы и силы гидродинамического сопротивления. Поэтому, в отличие от технических объектов, у человека при плавании отсутствует четкое разделение гидродинамических функций на пассивный корпус, который испытывает только сопротивление движению, и активный движитель, создающий силу тяги.

Необходимость дополнения существующей эффективной технологии кинематического анализа плавания человека экспериментальными динамическими характеристиками специалисты понимали достаточно давно. Наибольшее распространение и признание получил метод, разработанный R. Schlehauf [15]. Предложенный им трехмерный биомеханический анализ техники плавания является одним из наиболее эффективных методов определения кинематических характеристик системы движений пловца непосредственно в условиях соревновательной деятельности. В то же время квазистационарный расчет тотальной и эффективной пропульсивных сил изолированной кисти руки по известным для нее стационарным значениям гидродинамических коэффициентов подъемной силы и лобовой силы является методом приближенной оценки нестационарных режимов взаимодействия реального движителя с гидродинамическим потоком.

Кроме того, в этом случае не принимаются во внимание характерные для нестационарного движения значительные инерционные силы и внутрициклового сдвиг продвигающих сил и сил гидродинамического сопротивления по фазе. Поэтому до сих пор не удавалось определить количественно реальные внутрицикловые продвигающие силы и силы гидродинамического сопротивления, возникающие на уровне целостной биомеханической системы водных локомоций человека и сопоставить эти динамические характеристики с ключевыми кинематическими, т.е. внутрицикловыми показателями скорости и ускорения.

В то же время закономерности равномерного и нестационарного движения человека в водной среде существенно отличаются [9, 14]. На сегодняшний день отсутствуют надежные сведения о реальных биомеханических механизмах и закономерных зависимостях установившегося нестационарного плавания человека, что сдерживает дальнейший прогресс в подготовке элитных пловцов.

В процессе специального исследования решались следующие задачи:

1. Разработка экспериментального метода для определения основных биомеханических характеристик нестационарного плавания человека различными стилями.
2. Изучение закономерностей установившегося нестационарного движения элитных пловцов в водной среде.

МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ

Математическая модель биогиродинамического метода

Взаимодействие двух горизонтальных сил, как правило, не равных по мгновенным значениям и противоположно направленных, продвигающей силы и силы гидродинамического сопротивления в цикле плавательных движений, описывается уравнением установившегося нестационарного поступательного движения тела пловца в жидкости [10]

$$F_{p(e)}(t) - F_{r(f.d)}(t) = (m_0 + \Delta m) \times du/dt \quad (1)$$

где $F_{p(e)}(t)$ – мгновенное значение эффективной продвигающей силы, генерируемой пловцом (т.е. суммарной силы, создаваемой движителями пловца и возникающей в результате рабочих движений рук, ног и, в некоторых стилях плавания, туловища); $F_{r(f.d)}(t)$ – мгновенное значение лобовой компоненты силы активного (полного) гидродинамического сопротивления тела пловца при нестационарном движении; m_0 – масса тела пловца; Δm – присоединенная масса жидкости инерционного происхождения; $du_{(c.m.)}/dt$ – производная скорости по времени, т.е. мгновенное ускорение центра масс тела человека.

Величина присоединенной массы жидкости инерционного происхождения определяется на основании выражения

$$\Delta m = m_0 \times k_{11}, \quad (2)$$

где k_{11} – безразмерный коэффициент присоединенной массы жидкости.

Наиболее сложным вопросом в используемом подходе является определение мгновенных значений $F_{r(f.d)}(t)$. Это делается на основании уравнения гидродинамической реакции

$$F_{r(f.d)}(t) = C_{x(n)}(t) \times (\rho/2) \times S_{(b.s)}(t) \times u^2_{(p.b)}(t), \quad (3)$$

где $C_{x(n)}(t)$ – мгновенное значение безразмерного коэффициента лобовой силы гидродинамического сопротивления, соответствующее нестационарному режиму движения тела; ρ – плотность воды {кг·м⁻³}; $S_{(b.s)}(t)$ – мгновенное значение характерного гидродинамического размера тела испытуемого {м²};

$u_{(p.b.)(t)}$ – мгновенное значение скорости точки на поверхности тела человека при плавании $\{m \cdot c^{-1}\}$.

В свою очередь, $C_{x(n.)(t)}$ представляется выражением

$$C_{x(n.)(t)} = C_{x(f.d.)(t)} + \Delta C_{x(n.)(t)} (Re_l, Fr, a), \quad (4)$$

где $C_{x(f.d.)(t)}$ – мгновенное значение безразмерного коэффициента лобовой силы гидродинамического сопротивления, соответствующее стационарному режиму движения тела; $\Delta C_{x(n.)(t)}$ – мгновенное значение безразмерного коэффициента дополнительного вязкостного гидродинамического сопротивления, обусловленного нестационарностью движения; Re_l – число Рейнольдса; Fr – число Фруда; a – безразмерное ускорение.

Взаимодействие плывущего человека с водной средой имеет механическую природу, поэтому корректный теоретический анализ в сочетании с натурными опытами и биогиродинамическими испытаниями возможен только с позиций теории механического подобия и размерностей нестационарных процессов [1, 6].

Нестационарность плавания человека характеризуется прежде всего неравномерным поступательным движением со скоростью центра масс тела ($c.m.$) с переменной по времени (t) мгновенной скоростью (u), так что $u = u(t)$.

Важнейшей характеристикой является средняя скорость плавания (u_0) в данном режиме на участке пути определенной длины (l):

$$u_0 = \frac{1}{t} \int_0^t u(t) dt = \frac{l}{t} \quad (5)$$

Соответственно, безразмерная средняя скорость плавания определяется одним из критериев теории механического подобия – безразмерным числом Фруда (Fr) (относительная скорость), которое характеризует отношение сил инерции к силам тяжести

$$Fr = u_0 / \sqrt{g \times L}. \quad (6)$$

Здесь g – гравитационное ускорение $\{m/c^2\}$, L – длина тела испытуемого $\{m\}$. Критерий подобия Fr необходимо учитывать при движении тел с интенсивным волнообразованием на свободной поверхности, что и имеет место при плавании человека.

При изучении нестационарного плавания биологических объектов используются еще два определяющих гидродинамических безразмерных числа – критерии Рейнольдса (Re_l) и Струхала (Sh_u). Они выводятся из дифференциальных уравнений движения вязкой несжимаемой жидкости (уравнения Навье-Стокса), физически представляют собой отношения соответствующих сил, рассчитанных на единицу массы жидкости, и определяются через характерные параметры движения, присущие плаванию изучаемого биологического объекта (в данном случае – человека).

Критерий Рейнольдса представляет собой отношение конвективных (переносных) сил инерции и сил вязкости (внутреннего трения) жидкости и определяется выражением

$$Re_l = u_0 \times L / \nu. \quad (7)$$

Здесь u_0 , L обозначены так же, как ранее; ν – кинематический коэффициент вязкости воды, зависящий от ее температуры. Значение ν при средней температуре воды в плавательных бассейнах $27^\circ C$ равно $0,90 \cdot 10^{-6} m^2/c$.

Степень неравномерности плавания в различные моменты цикла движений наиболее точно оценивается абсолютным ускорением центра масс тела человека $a_{(c.m.)} = du(t)/dt$ и его безразмерной величиной

$$a = \frac{L}{u^2(t)} \times \frac{du(t)}{dt}. \quad (8)$$

Однако для использования выражения (8) требуется бóльшая информация о кинематике нестационарного плавания, что не во всех случаях, имеющих место при анализе в данной работе, достижимо. Поэтому используется критерий Струхалия (Sh_u), характеризующий неравномерность всего (полного) цикла движений пловца различными спортивными стилями. Критерий представляет собой отношение локальных (местных) и конвективных сил инерции жидкости и определяется выражением

$$Sh_u = \frac{L}{u_0^2} \times \frac{2du}{T}. \quad (9)$$

Здесь, применительно к плаванию человека, $2du$ – удвоенная разница между максимальной скоростью ($u_{\max(c.m.)}$) и минимальной скоростью ($u_{\min(c.m.)}$) центра масс тела человека в цикле движений стилями плавания дельфин и брасс, T – время одного цикла регулярно повторяющегося процесса (период) $\{c\}$. Для стилей плавания вольный стиль и кроль на спине $2du$ полного цикла равно $2du$ полуцикла движений правой рукой плюс $2du$ полуцикла движений левой рукой.

Критерии Fr , Re_l и Sh_u полностью определяют динамическое подобие нестационарного плавания человека с интенсивным волнообразованием и позволяют использовать с минимальными и контролируруемыми допущениями необходимые экспериментальные данные, полученные в гидробионике, биомеханике, гидромеханике, а также сопоставлять результаты, полученные на "модели" и "натуре" в ходе выполнения данного экспериментального исследования.

В данном исследовании диапазон значений числа Fr заключен между минимальной величиной в 0,32 (брасс, женщины) и максимальной величиной в 0,46 (кроль на груди, мужчины).

Диапазон значений числа Re_l заключен между минимальной величиной в $2,58 \cdot 10^6$ (брасс, женщины) и максимальной величиной в $4,46 \cdot 10^6$ (кроль на груди, мужчины). Указанный диапазон числа Re_l входит в область сравнительно высоких чисел $Re_l = 10^3 - 10^7$ с преобладающим значением сил инерции [1, 5].

В указанном выше диапазоне чисел Re_l и Fr при стационарном режиме движения тела спортсмена вязкостное сопротивление составляет 85–90% от полного гидродинамического сопротивления [3].

Диапазон значений числа Струхалия Sh_u заключен между минимальной величиной в 0,137 (кроль, мужчины) и максимальной величиной в 1,410 (брасс, женщины).

Технология определения переменных математической модели

Для решения уравнения (1) с целью определения искомой величины мгновенного значения эффективной пропульсивной силы ($F_{p(e)}(t)$) мы должны иметь экспериментальные значения $du_{(c.m.)}/dt$, $F_{r(f.d.)}(t)$ и Δm .

Скорость и ускорение центра масс тела

Акустическим способом (с использованием эффекта Доплера) первоначально измеряются значения мгновенной поступательной скорости точки на поверхности тела человека при плавании с предельной скоростью ($u_{(p.b.)}(t)$) [2]. Одновременно проводится подводная и надводная видеозапись движений испытуемого [16]. Все видеокамеры фокусируются на средней части плавательной дорожки на отметке 40 метров от старта, на которой проводится тестирование. Для анализа кинематических и динамических характеристик плавания испытуемого выбирается один цикл движений в районе указанной отметки.

Далее, с использованием пакета специальных прикладных программ, на основании синхронизированной видеозаписи плавания испытуемого проводится трехмерный кинематический анализ движения всех основных звеньев тела человека. На основании результатов этого анализа, с использованием методики *D. Troup* [12, 15], учитывающей массы и моменты инерции основных звеньев тела, экспериментальные значения $u_{(p.b.)}(t)$ трансформируются в значения мгновенной поступательной скорости центра масс тела испытуемого ($u_{(c.m.)}(t)$). Значения мгновенного ускорения центра масс тела человека ($a_{(c.m.)}(t)$) определяются по временным производным ($du_{(c.m.)}/dt$).

Лобовая компонента силы активного гидродинамического сопротивления тела пловца при нестационарном движении

Лобовая компонента силы $F_{r(f.d.)}(t)$ определяется на основании экспериментального определения переменных уравнения (3).

Мгновенное значение характерного размера тела испытуемого ($S_{(b.s.)}(t)$) определяется как конкретная величина объема тела испытуемого, находящаяся в воде в данный момент времени, в степени $2/3$ $\{m^2\}$. В указанный объем не включаются объемы звеньев тела, которые в данный момент цикла являются движителями и имеют отрицательный вектор по отношению к направлению поступательного движения центра масс тела испытуемого. Данная величина определяется экспериментально на основании результатов трехмерного кинематического анализа движения всех основных звеньев тела человека.

Мгновенные значения $C_{x(f.d.)}(t)$ для каждого испытуемого определяются в различном количестве наиболее характерных положений тела испытуемого (от 6 до 12 исследуемых позиций в зависимости от стиля плавания). Данные позиции также отбираются на основании предварительного кинематического анализа видеозаписи.

В зависимости от исследуемой позиции тела испытуемого $C_{x(f.d.)}(t)$ определяется при стационарном режиме обтекания двумя различными путями. В первом случае, когда $S_{(b.s.)}(t)$ исследуемой позиции не имеет каких-нибудь исключаемых сегментов движителей, $C_{x(f.d.)}(t)$ рассчитывается на основании измерения результатов гидродинамического сопротивления испытуемого в гидроканале.

Во втором случае, когда $S_{(b.s.)}(t)$ исследуемой позиции имеет исключаемые сегменты движителей, используются экспериментальные значения $C_{x(f.d.)}(t)$ специальной модели человеческого тела [11, 13]. Так, например, в стиле дельфин в фазе отталкивания исключаются определенные сегменты рук или в стиле брасс в фазе удара ногами исключаются определенные сегменты ног. Модель человеческого тела длиной 1,85 метра исследовалась в гидроканале при стационарном режиме обтекания в диапазоне чисел $Re_l = (1,0-5,0) \cdot 10^6$ при скоростях гидродинамического потока до 2,2 м/с. Конструкция модели позволяет исключать любые объемы сегментов человеческого тела, которые в данный момент являются движителями, и, следовательно, не испытывают фронтального гидродинамического сопротивления. Такой подход позволил определить экспериментальные зависимости между $C_{x(f.d.)}(t)$ и различным объемом исключаемых сегментов движителей модели во всех изучаемых стилях плавания. Модель исследовалась во всех рассматриваемых позициях тела испытуемого с различными значениями $S_{(b.s.)}(t)$.

Для определения $\Delta C_{x(n.)}(t)$ использовались экспериментальные значения коэффициента дополнительного вязкостного сопротивления при нестационарном движении твердого тела вращения (рис. 1), которые были получены в процессе специального экспериментально-теоретического исследования [8]. Были проведены специальные испытания данного тела длиной $L = 1,5$ м, наибольшим диаметром $d = 0,21$ м (удлинение $L/d = 7,15$), при движении тела вблизи свободной поверхности.

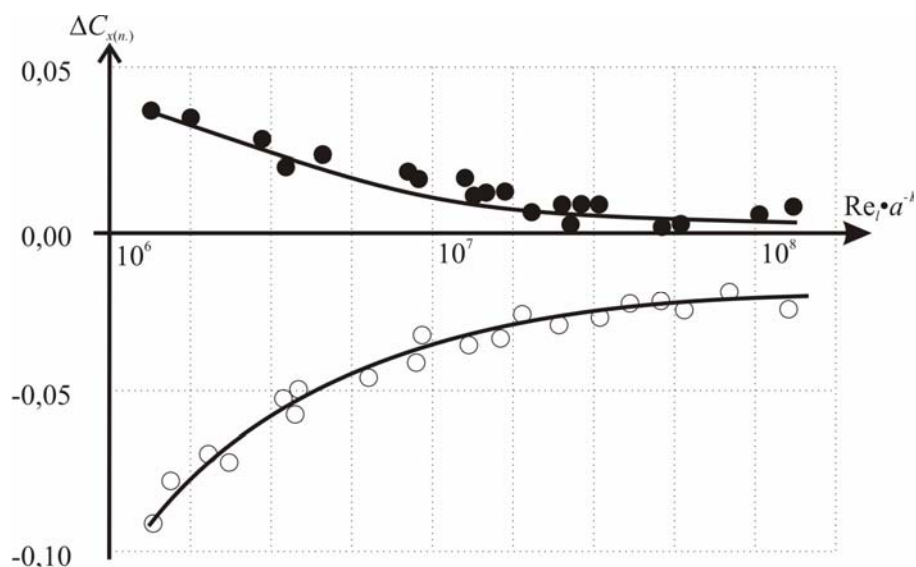


Рис. 1. Экспериментальные значения безразмерного коэффициента дополнительного вязкостного сопротивления при нестационарном движении твердого тела вращения согласно линейному закону изменения скорости $\Delta C_{x(n)}$ ($Re_l \cdot a^{-1}$): ● – положительное ускорение, ○ – отрицательное ускорение.

Нестационарные испытания проводились при скоростях буксировки тела до 3,0 м/с, в диапазоне чисел $Re_l = (1,0-5,0) \cdot 10^6$ согласно трем законам изменения скорости: по линейному с положительным и отрицательным ускорением, по экспоненциальному, по синусоидальному. Диапазон критериев подобия Fr , Re_l и безразмерного ускорения (a), используемый при этом исследовании, полностью включает диапазон этих показателей для испытуемых данного исследовательского проекта, что и является объективным основанием для использования полученных экспериментальных значений $\Delta C_{x(n)}(t)$. Анализ результатов, представленных на рис. 1, отчетливо показывает, что положительное ускорение приводит к увеличению вязкостного сопротивления тела, а отрицательное ускорение уменьшает его значения.

Мгновенные значения $C_{x(f.d.)}(t)$, $\Delta C_{x(n)}(t)$ и $S_{(b.s.)}(t)$ вводились в прикладную компьютерную программу для расчета $F_{r(f.d.)}(t)$ с дискретностью, зависящей от числа наиболее типичных позиций тела испытуемого в анализируемом цикле движений.

Присоединенная масса жидкости инерционного происхождения (Δm)

Величина Δm определялась на основании уравнения (2). Значения безразмерного коэффициента (k_{11}) определялись экспериментально (на основании натуральных испытаний), т.е. путем сравнения результатов измерения пассивного гидродинамического сопротивления ($F_{r(p.d.)}$) на установке гравитационного типа ($du/dt = 0$) и инерционным методом ($du/dt \neq 0$) [11, 13]. Диапазон значений k_{11} для испытуемых данного проекта заключен между минимальной величиной в 0,097 и максимальной величиной в 0,139. Эти значения k_{11} близки к значению коэффициента присоединенной массы для равновеликого эллипсоида вращения в поступательном нестационарном движении вдоль длинной оси ($k_{11} = 0,09$), которое обычно используют при исследовании гидробионтов, где возможность экспериментального определения k_{11} отсутствует [5].

Полезная внешняя механическая мощность (P_{uo}), тотальная внешняя механическая мощность (P_{to}) и пропульсивная эффективность (e_p)

Установившееся нестационарное движение предполагает сохранение постоянной средней скорости плавания биологического объекта в течение нескольких

последовательных биомеханических циклов ($u_{0(c.m.)} = \text{const}$). Основным условием такого движения, очевидным из уравнения (1), является равенство средних значений $F_{p(e)}$ и $F_{r(f.d.)}$ за анализируемый цикл ($F_{p(e)} - F_{r(f.d.)} = 0$). В свою очередь, также очевидным и неоднократно экспериментально подтвержденным является равенство в данном цикле и средних значений тотальной продвигающей силы ($F_{p(t)}$) и силы активного гидродинамического сопротивления ($F_{r(a.d.)}$) [10, 12, 13, 18].

Полная величина $F_{p(t)}$ представляется суммой трех составляющих

$$F_{p(t)} = F_{p(e)} + F_1 + F_2, \quad (10)$$

где $F_{p(e)}$ – эффективная пропульсивная сила, идущая на преодоление $F_{r(f.d.)}$; F_1 – сила, расходуемая на перемещение специфической массы воды назад, необходимое для создания пропульсивной силы; F_2 – сила, расходуемая на образование турбулентных вихрей при взаимодействии движителя с водной средой и на индуктивное сопротивление движителя. Отсюда становится очевидной и физическая разница между $F_{r(a.d.)}$ и $F_{r(f.d.)}$, которые одновременно должны определяться разными экспериментальными методами, специально ориентированными на измерение соответствующих сил в условиях нестационарного движения испытуемого. Поэтому одновременно с измерением акустическим способом значений $u_{(p.b.)}(t)$, методом малых возмущений определяется величина $F_{r(a.d.)}$ [9] и на основании стандартного уравнения гидродинамической реакции рассчитывается безразмерный коэффициент силы активного гидродинамического сопротивления ($C_{x(a.d.)}$).

Безразмерный коэффициент эффективности (C_e) определялся как отношение среднего значения $F_{p(e)}$ к среднему значению $F_{p(t)}$ движителей испытуемого в цикле. Индивидуальное значение C_e вводилось в программу в качестве постоянной величины для определения мгновенных значений $F_{p(t)}(t)$ в анализируемом цикле движений

$$F_{p(t)}(t) = F_{p(e)}(t) / C_e. \quad (11)$$

Полезная внешняя механическая мощность (P_{uo}) и тотальная внешняя механическая мощность (P_{to}) определялись соответственно по следующим формулам:

$$P_{uo} = F_{r(f.d.)} \times u_{0(c.m.)}, \quad (12)$$

$$P_{to} = F_{r(a.d.)} \times u_{0(c.m.)}, \quad (13)$$

где $u_{0(c.m.)}$ – средняя скорость центра масс тела испытуемого в анализируемом цикле.

Пропульсивная эффективность (e_p) определялась следующим образом [5, 10, 16]:

$$e_p = P_{uo} / P_{to}. \quad (14)$$

При графическом представлении индивидуальных результатов биомеханического анализа цикла плавательных движений человека, мгновенные значения показателей поступательной скорости ($u_{(c.m.)}(t)$) и ускорения центра масс тела ($a_{(c.m.)}(t)$), лобовой компоненты силы активного гидродинамического сопротивления тела ($F_{r(f.d.)}(t)$), суммарной эффективной ($F_{p(e)}(t)$) и суммарной тотальной ($F_{p(t)}(t)$) продвигающих сил движителей аппроксимировались полиномами соответствующих степеней и выводились на экран дисплея или принтер.

В данной работе для описания и обозначения фаз движений в цикле используется классификация этого процесса, предложенная Р.Б. Хальяндром [7]. Каждый график содержит индивидуальные временные характеристики всех фаз движений в полном цикле и сопровождается графическим изображением граничных моментов этих фаз.

ОРГАНИЗАЦИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

Экспериментальное исследование было осуществлено в периоды непосредственной подготовки испытуемых к летним Олимпийским играм 1992 года в Барселоне и 1996 года в Атланте, а также к чемпионату мира по плаванию 1994 года в Риме. В исследовании приняли участие две испытуемых женского пола и семь испытуемых мужского пола в возрасте от 17 до 26 лет. Все испытуемые на момент тестирования входили в первую десятку спортсменов мирового рейтинга.

Биогидродинамический анализ системы движений проводился предельно близко к дате главного старта сезона, когда испытуемый начинает входить в так называемое состояние "спортивной формы" и достигает максимальных показателей скорости плавания.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 2–10 представлены результаты индивидуального биогидродинамического анализа плавания испытуемых различными спортивными стилями. Кроме того, средние значения основных экспериментальных показателей за анализируемый цикл движений испытуемого, а также другие индивидуальные характеристики, необходимые для экспериментального решения поставленных задач, представлены в таблице. На рис. 11 и 12 представлены итоговые критериальные зависимости между числами Струхаля (Sh_u) и Рейнольдса (Re_l), а также числом Струхаля (Sh_u) и безразмерным коэффициентом гидродинамической силы ($C_{x(a.d.)}$), полученные экспериментально в ходе реализации проекта.

Анализ индивидуальных результатов показывает, что использование биогидродинамического метода позволило впервые определить количественно реальные внутрицикловые продвигающие силы и силу лобового гидродинамического сопротивления, возникающие при плавании различными стилями на уровне целостной биомеханической системы водных локомоций человека.

Сопоставление полученных динамических характеристик с кинематическими показало, что внутрицикловые изменения мгновенных значений поступательной скорости центра масс тела человека ($u_{(c.m.)}(t)$) во всех спортивных стилях плавания жестко взаимосвязаны с определенными фазами циклов. Кроме того, эти изменения четко количественно детерминированы разницей мгновенных значений эффективной продвигающей силы ($F_{p(e.)}(t)$) и силы лобового гидродинамического сопротивления ($F_{r(f.d.)}(t)$). Независимо от стиля плавания основными причинами максимальных значений тотальной и эффективной продвигающих сил в определенных фазах цикла являются оптимальные скорости движителя и значительное увеличение мгновенных значений характерного размера движителя за счет эффективной гидродинамической ориентации. Только в стилях плавания дельфин и брасс в определенных фазах цикла возникают отрицательные значения эффективной продвигающей силы, связанные с подготовительными движениями рук и ног.

Во всех изучаемых стилях плавания наблюдается фазовый угол сдвига ($\Delta\theta$) между пиковыми значениями эффективной продвигающей силы ($F_{p(e.)}(t)$) и силы лобового гидродинамического сопротивления ($F_{r(f.d.)}(t)$). Среднее значение $\Delta\theta$ у испытуемых данного проекта составляет величину, близкую к $0,5\pi$ радиан (диапазон колебаний от $0,27\pi$ радиан до $0,67\pi$ радиан). Экспериментальные исследования плавания гидробионтов показали, что фазовый угол сдвига, равный $0,5\pi$ радиан, соответствует максимальным значениям пропульсивной эффективности последних [17].

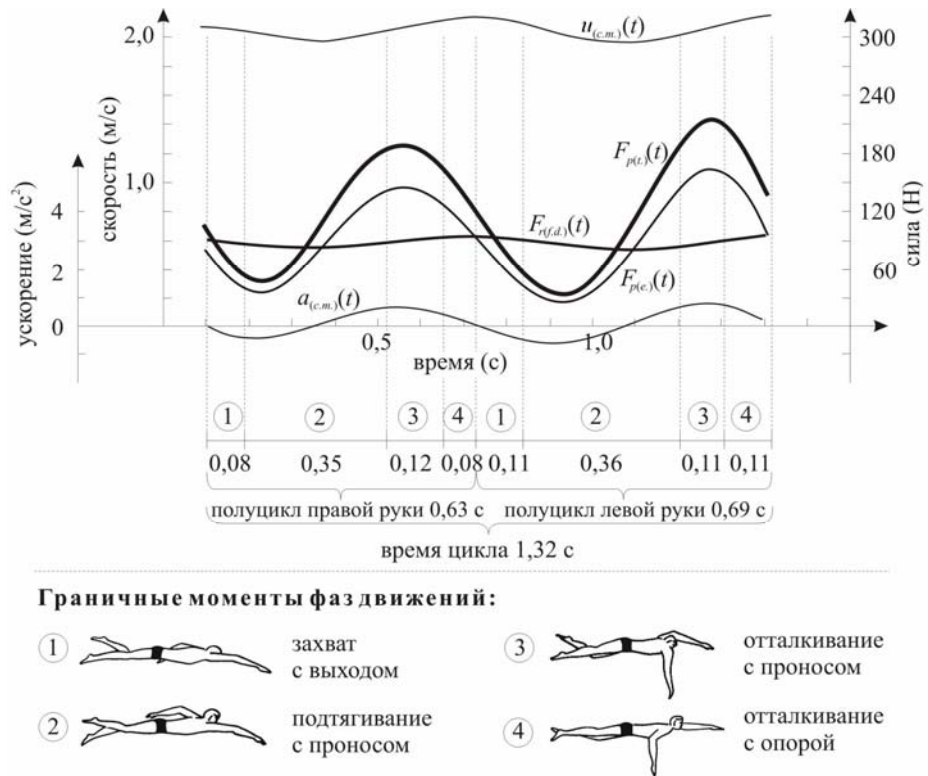


Рис. 2. Кинематические и динамические характеристики цикла движений в плавании стилем кроль на груди испытуемого № 81, победителя Олимпийских игр в Барселоне на спринтерских дистанциях

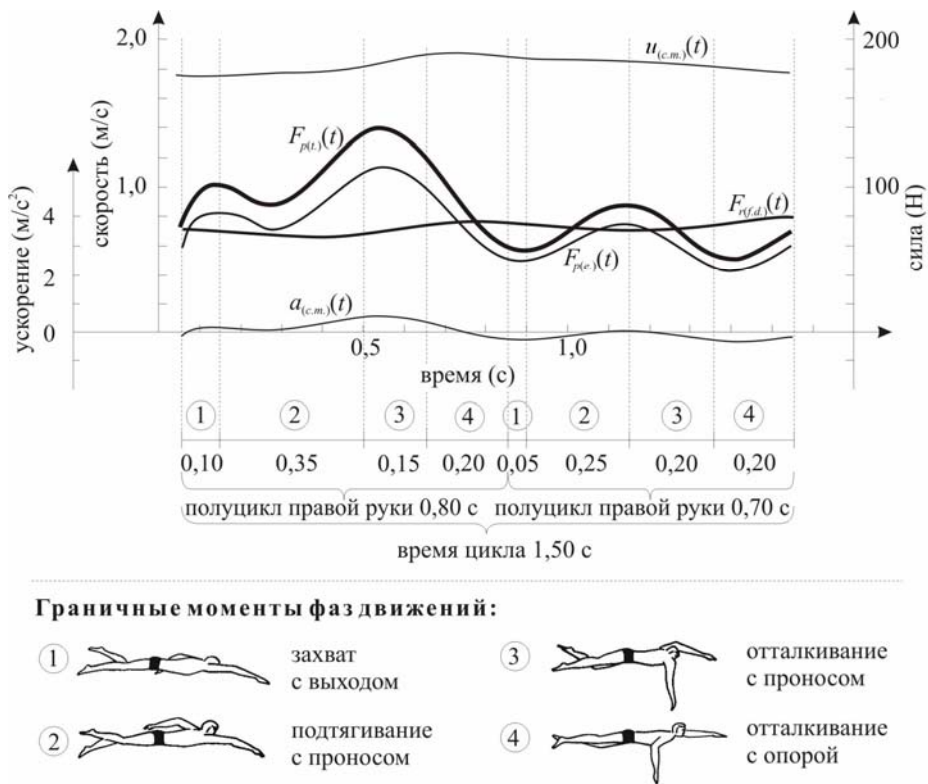


Рис. 3. Кинематические и динамические характеристики цикла движений в плавании стилем кроль на груди испытуемого № 121, победителя Олимпийских игр в Барселоне на средних дистанциях.

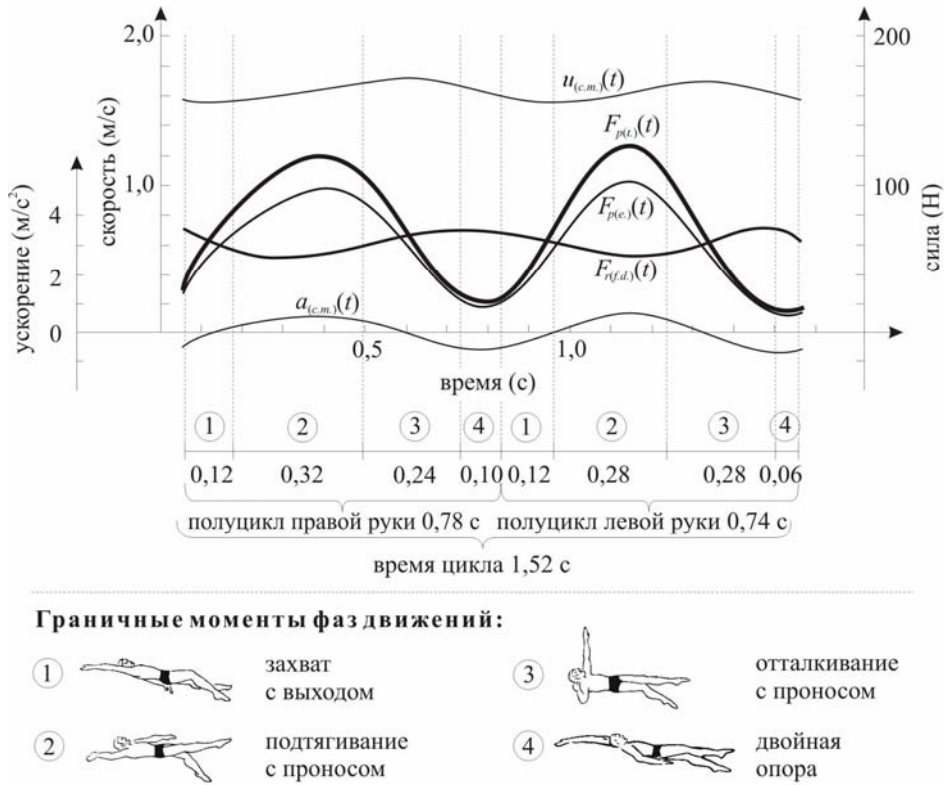


Рис. 4. Кинематические и динамические характеристики цикла движений в плавании стилем кроль на спине испытуемого № 16, победителя чемпионата мира в Риме на дистанции 200 метров

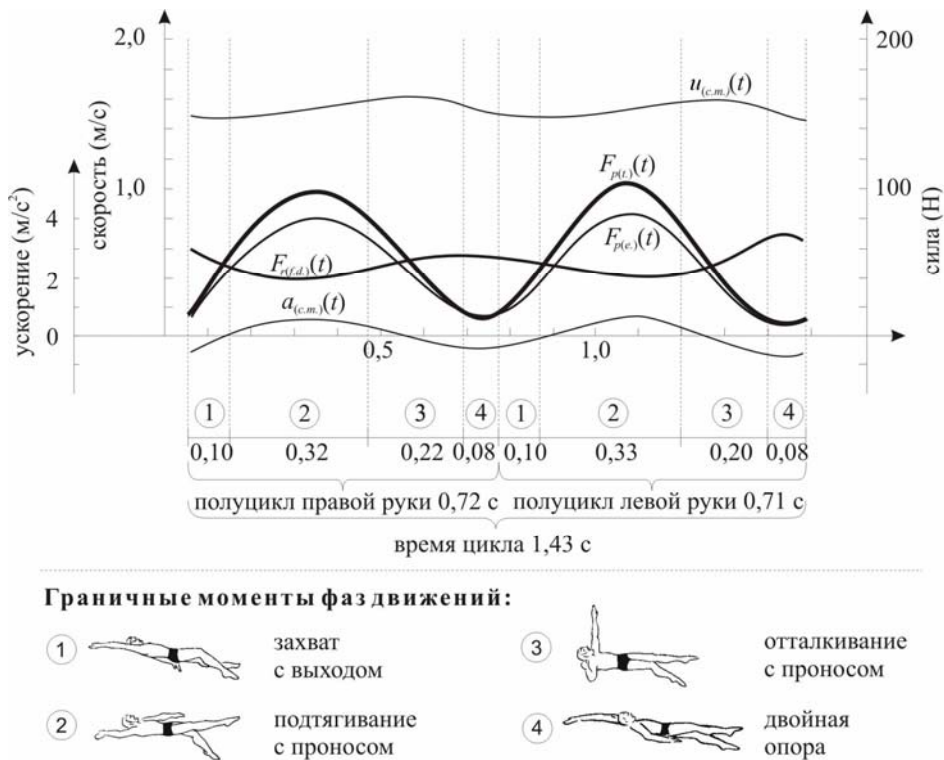
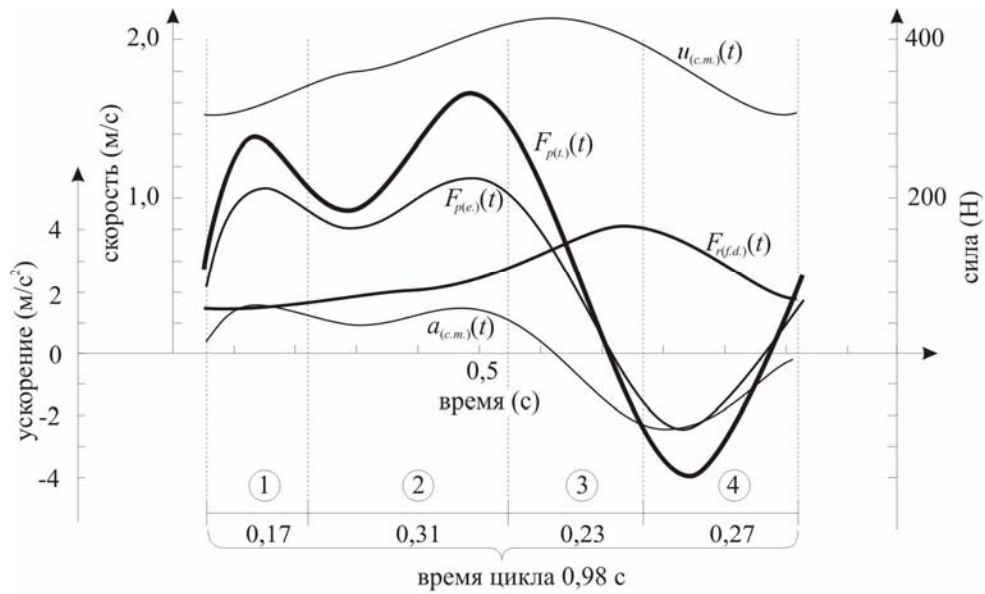


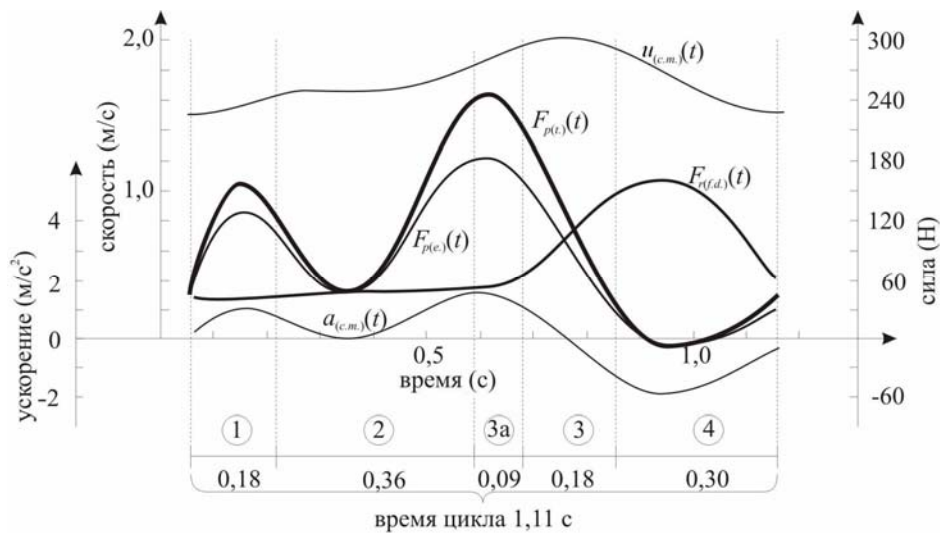
Рис. 5. Кинематические и динамические характеристики цикла движений в плавании стилем кроль на спине испытуемой № 203, призера Олимпийских игр в Атланте на дистанции 100 метров



Граничные моменты фаз движений:

- ① удар с погружением
- ② подтягивание с выходом
- ③ отталкивание с ударом
- ④ "полет" с проносом

Рис. 6. Кинематические и динамические характеристики цикла движений в плавании стилем дельфин испытуемого № 206, призера Олимпийских игр в Атланте на дистанции 100 метров



Граничные моменты фаз движений:

- ① удар с погружением
- ② подтягивание с выходом
- 3a отталкивание
- ③ отталкивание с ударом
- ④ "полет" с проносом

Рис. 7. Кинематические и динамические характеристики цикла движений в плавании стилем дельфин испытуемого № 137, победителя Олимпийских игр в Атланте на дистанциях 100 и 200 метров

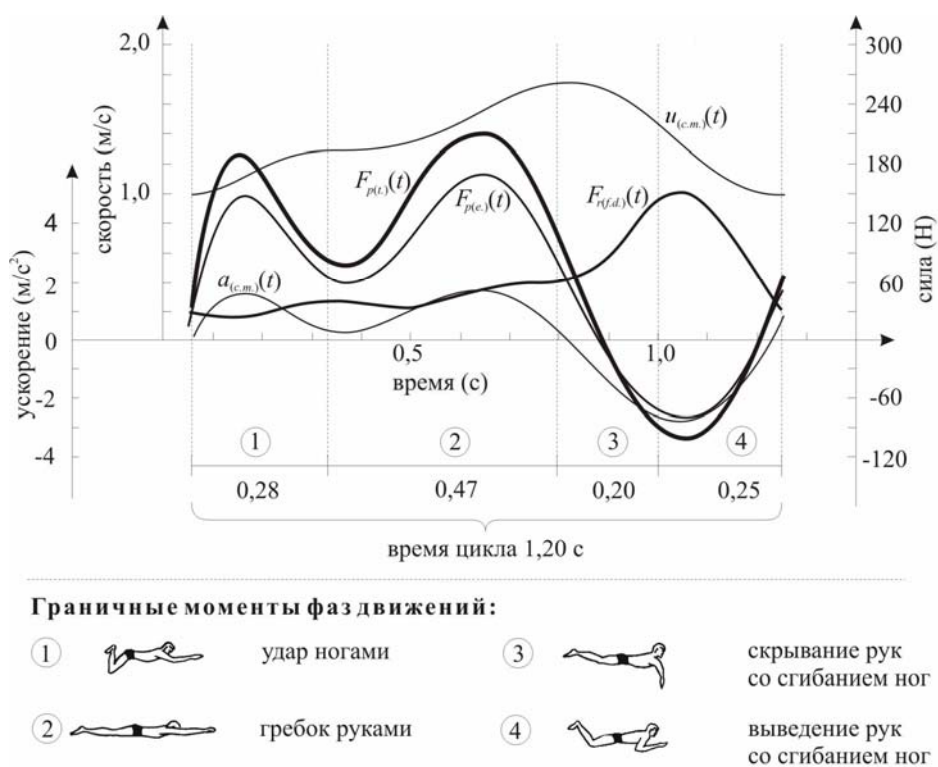


Рис. 8. Кинематические и динамические характеристики цикла движений в плавании стилем брасс испытуемой № 64, победителя Олимпийских игр в Барселоне на дистанции 100 метров

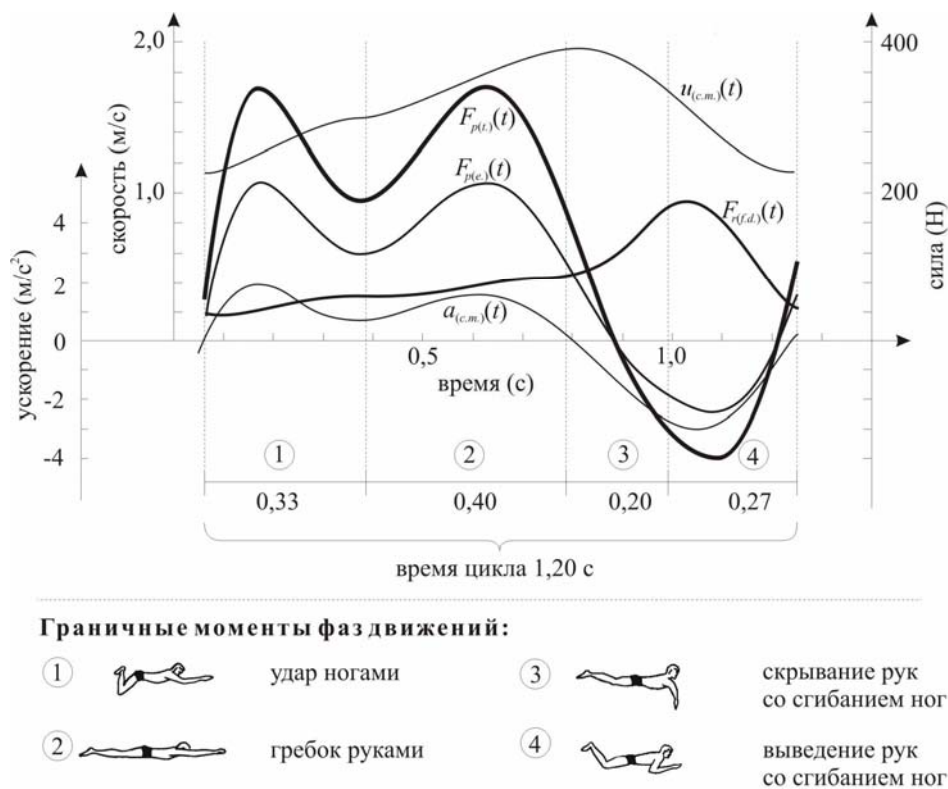


Рис. 9. Кинематические и динамические характеристики цикла движений в плавании стилем брасс испытуемого № 511, финалиста чемпионата мира в Риме на дистанции 100 метров

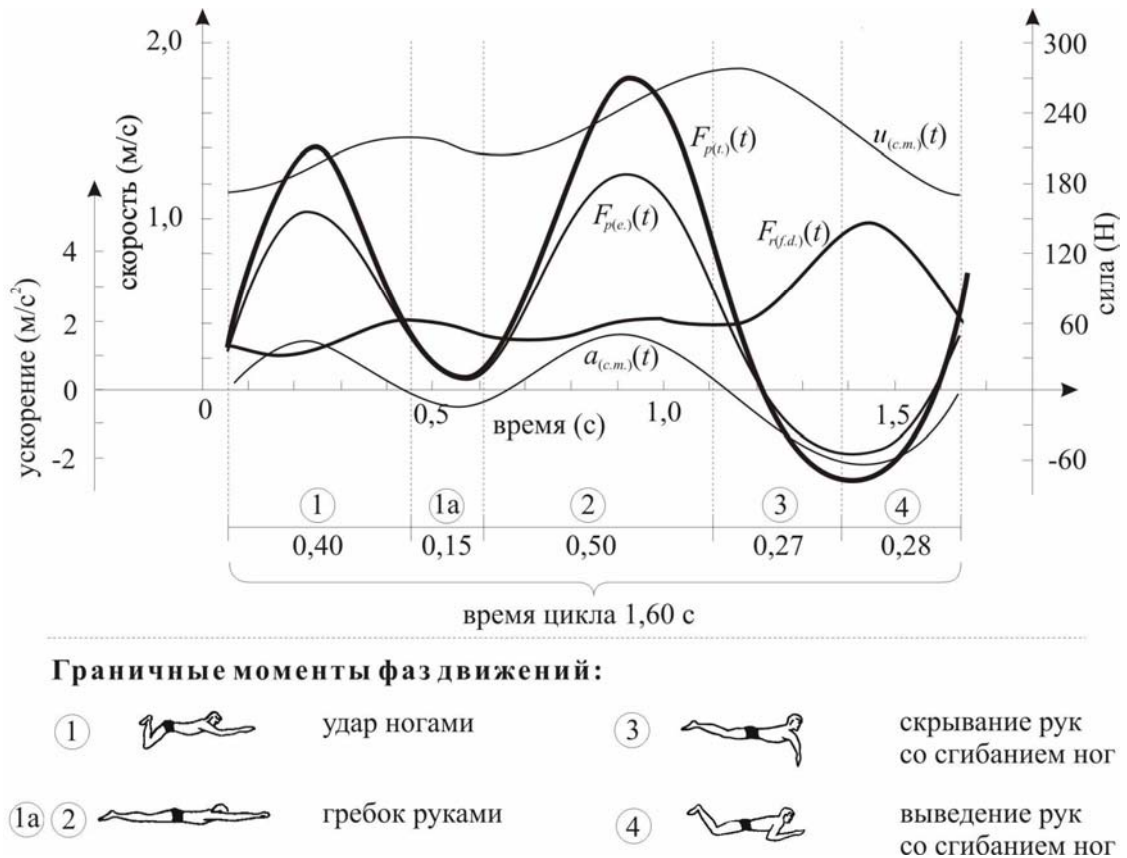


Рис. 10. Кинематические и динамические характеристики цикла движений в плавании стилем брасс испытуемого № 134, финалиста чемпионата мира в Риме на дистанции 200 метров

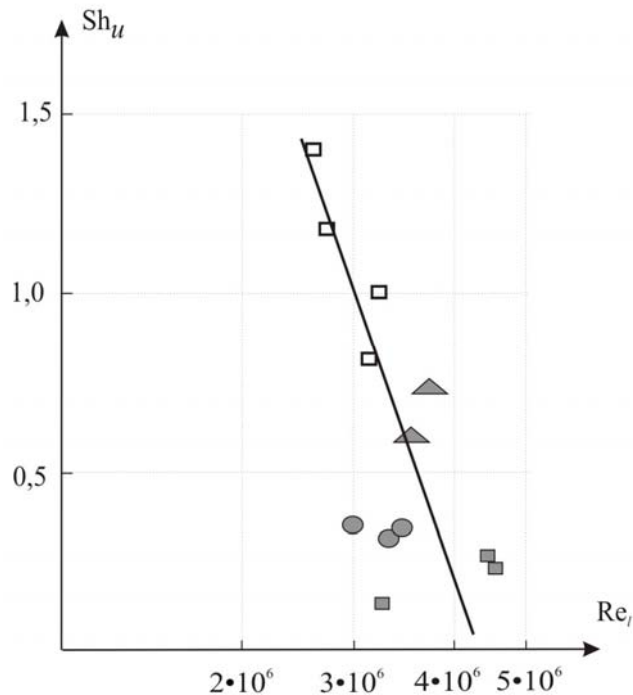


Рис. 11. Итоговая критериальная зависимость между числами Струхаля (Sh_u) и Рейнольдса (Re_l) в различных стилях плавания: ■ – кроль на груди, ▲ – дельфин, ● – кроль на спине, □ – брасс

**Значения экспериментальных показателей основных характеристик биогиродинамического анализа
в цикле движений испытуемых**

№	Название характеристики	Обозначение	Размерность в СИ	№ 81	№ 121	№ 16	№ 203	№ 206	№ 137	№ 64	№ 511	№ 134
1	Длина тела	L	м	1,97	1,87	1,89	1,78	1,90	1,87	1,75	1,89	1,90
2	Масса тела	m_0	кг	87,00	74,50	74,00	68,00	83,00	79,30	66,20	80,50	76,00
3	Масса жидкости инерционного происхождения	Δm	кг	8,42	8,40	7,40	7,00	11,29	9,50	8,75	10,70	10,60
4	Критерий Струхала	Sh_u		0,225	0,137	0,335	0,347	0,734	0,599	1,19	1,08	0,801
5	Критерий Рейнольдса (10^6)	Re_l		4,44	3,76	3,38	2,99	3,79	3,55	2,62	3,25	3,10
6	Длина цикла	$l_{(c)}$	м	2,68	2,715	2,45	2,17	1,76	1,90	1,62	1,86	2,35
7	Средняя скорость центра масс тела	$u_{o(c.m.)}$	м·с ⁻¹	2,029	1,810	1,611	1,514	1,794	1,710	1,346	1,548	1,471
8	Безразмерный коэффициент силы пассивного сопротивления	$C_{x(p.d.)}$		0,274	0,290	0,291	0,320	0,340	0,263	0,288	0,286	0,286
9	Сила пассивного сопротивления	$F_{r(p.d.)}$	Н	110,46	83,88	66,22	59,45	101,14	71,12	43,07	63,57	55,82
10	Характерный гидродинамический размер тела	$S_{o(b.s.)}$	м ²	0,152	0,150	0,154	0,145	0,168	0,153	0,147	0,168	0,160
11	Безразмерный коэффициент силы лобового сопротивления	$C_{x(f.d.)}$		0,271	0,288	0,299	0,285	0,354	0,340	0,465	0,430	0,381
12	Сила лобового сопротивления	$F_{r(f.d.)}$	Н	75,15	64,64	55,67	43,77	89,71	69,73	59,03	81,49	62,41
13	Безразмерный коэффициент силы активного сопротивления	$C_{x(a.d.)}$		0,305	0,306	0,324	0,314	0,450	0,377	0,548	0,631	0,445
14	Сила активного сопротивления	$F_{r(a.d.)}$	Н	98,92	77,25	66,33	53,31	125,65	86,99	75,93	130,11	79,80
15	Полезная внешняя механическая мощность	P_{uo}	Вт	152,48	117,00	89,68	66,28	157,89	119,24	79,45	126,15	91,80
16	Тотальная внешняя механическая мощность	P_{to}	Вт	200,71	139,82	106,86	80,71	221,14	148,75	102,20	201,41	117,38
17	Безразмерный коэффициент пропульсивной эффективности	e_p		0,760	0,837	0,829	0,821	0,714	0,802	0,777	0,626	0,782

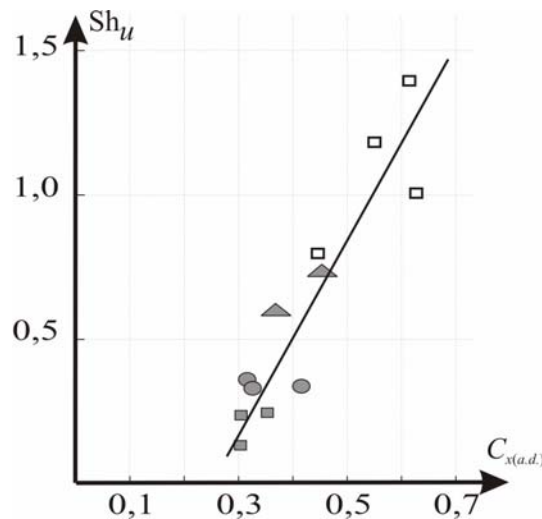


Рис. 12. Итоговая критериальная зависимость между числом Струхалия (Sh_u) и безразмерным коэффициентом гидродинамической силы ($C_{x(a.d.)}$) в различных стилях плавания:
 ■ – кроль на груди, ▲ – дельфин, ● – кроль на спине, □ – брасс

Значения коэффициента пропульсивной эффективности (e_p) (диапазон колебаний e_p от 0,626 до 0,837) сопоставимы с аналогичной характеристикой для волнового и винтового типа движителей [4, 5]. Кроме того, эти значения e_p несколько выше значений аналогичного показателя у менее квалифицированных спортсменов [17, 18]. Здесь необходимо отметить, что данные, которые используются для сравнения, получены принципиально другим методом измерения e_p (*MAD-system*) [17].

Средние значения гидродинамической силы лобового сопротивления ($F_{r(f.d.)}$) в условиях реальных водных локомоций стилями плавания кроль на груди, кроль на спине и дельфин меньше средних значений пассивного гидродинамического сопротивления ($F_{r(p.d.)}$) в условиях стационарного движения на аналогичной скорости. Двумя основными причинами этого являются нестационарность движения и уменьшение характерного размера тела в реальных условиях плавания. Кроме того, это обстоятельство исчерпывающе объясняет экспериментальный факт, неоднократно отмечаемый нами ранее, что в стиле плавания брасс имеют место неравенства $C_{x(a.d.)} > C_{x(p.d.)}$, $F_{r(a.d.)} > F_{r(p.d.)}$ [3, 9, 12, 13].

Анализ результатов, представленных на рис. 11 и 12, показывает, что наблюдаемое снижение нестационарности плавания спортивными стилями от брасса ($Sh_u = 1,0-1,5$) до кроля на груди ($Sh_u = 0,1-0,4$) сопровождается повышением числа Рейнольдса (Re_l) и снижением безразмерного коэффициента гидродинамической силы ($C_{x(a.d.)}$). Следовательно, весьма существенное значение для эффективности плавания человека имеют внутрицикловые колебания скорости, зависящие от биомеханических особенностей различных спортивных стилей. Все это позволяет однозначно говорить о регулирующем значении критерия Струхалия (Sh_u) при установившемся нестационарном плавании человека.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Козлов, Л.Ф. Теоретическая биогиродинамика / Л.Ф. Козлов. – Киев: Высшая школа, 1983.
2. Койгеров, С.В. Средства оперативного контроля за спортивно-технической подготовленностью высококвалифицированных пловцов / С.В. Койгеров, А.В. Укстин, К.К. Молинский // Теория и практика физической культуры. – 1984. – № 7. – С. 7–9.
3. Колмогоров, С.В. Гидродинамические характеристики элитных пловцов на различных этапах подготовки / С.В. Колмогоров, Г.Г. Турецкий, С.В. Койгеров, О.А. Румянцева // Теория и практика физической культуры. – 1991. – № 12. – С. 21–29.
4. Логвинович, Г.В. Гидродинамика плавания рыб / Г.В. Логвинович // Бионика: сб. науч. тр. – Киев: Наукова Думка, 1973. – С. 3–8.
5. Першин, С.В. Основы гидробионики / С.В. Першин. – М.: Судостроение, 1988.

6. *Федяевский, К.К.* Гидромеханика / К.К. Федяевский, Я.И. Войткунский, Ю.И. Фаддеев. – Л.: Судостроение, 1968.
7. *Хальянд, Р.Б.* Модели техники спортивных способов плавания с методикой совершенствования и контроля / Р.Б. Хальянд, Т.А. Тамп, Р.Р. Каал. – Таллин: Изд-во Таллинского педагогического института, 1986.
8. *Шебалов, А.И.* Некоторые вопросы влияния нестационарности на "механизм" образования сопротивления / А.И. Шебалов // Бионика: сб. науч. тр. – Киев: Наукова Думка, 1969. – С. 61–66.
9. *Kolmogorov, S.* Active drag, useful mechanical power output and hydrodynamic force coefficient in different swimming strokes at maximal velocity / S. Kolmogorov, O. Duplisheva // J. Biomechanics. – 1992. – Vol. 25. – P. 311–318.
10. *Kolmogorov, S.* Biomechanics of a set unstationary active motion of biological objects in water environment: from concepts to technologies / S. Kolmogorov, S. Lyapin // Proceedings of VIII Conference Biomechanics and Medicine in Swimming / K. Keskinen, P. Komi, P. Hollander (Eds). – Jyvaskyla, Gummerus Printing, 1999. – P. 119–124.
11. *Kolmogorov, S.* Technology for decreasing active drag at maximal swimming velocity / S. Kolmogorov, S. Lyapin, O. Rummyantseva, J.P. Vilas-Boas // Proceedings of XVIII International Symposium on Biomechanics in Sports: Application of Biomechanical Study in Swimming. In R. Sanders, Y. Hong (Eds). – Hong Kong, The Chinese University Press, 2000. – P. 39–47.
12. *Kolmogorov, S.* Hydrodynamic characteristics of competitive swimmers of different genders and performance levels / S. Kolmogorov, O. Rummyantseva, B. Gordon, J. Cappaert // J. Appl. Biomechanics. – 1997. – Vol. 13. – P. 88–97.
13. *Kolmogorov, S.* Interconnection between the functional and technical; preparedness of top-performing swimmers in final large training cycle / S. Kolmogorov, G. Turetsky, T. Fomitchenko // J. Treinamento Desportivo. – 1999. – Vol. 4. – P. 5–17.
14. *Pai, Y.* A hydrodynamic study of oscillation motion in swimming / Y. Pai, J. Hay // International Journal of Sports Biomechanics. – 1988. – Vol. 4. – P. 21–37.
15. *Schleithauf, R.* A hydrodynamic analysis of swimming propulsion // In Swimming III / J. Terauds, E. Bedingfield (Eds). – Baltimore, University Park Press, 1979. – P. 70–109.
16. Studies by the International Centre for Aquatic Research 1990-1991 / Ed. J. Troup. – Colorado Springs: USS Press, 1991.
17. *Toussaint, H.* Mechanics and energetics of swimming: PhD dissertation. – Vrije Universiteit te Amsterdam, 1988.
18. *Toussaint, H.M.* The determination of drag in front crawl swimming / H.M. Toussaint, P.E. Roos, S.V. Kolmogorov // Journal of Biomechanics. – 2004. – Vol. 37, No. 11. – P. 1655–1663.

KINEMATIC AND DYNAMIC CHARACTERISTICS OF STEADY-STATE NON-STATIONARY MOTION OF ELITE SWIMMERS

S.V. Kolmogorov (Archangelsk, Russia)

A biohydrodynamic method elaborated on extensive previous research is presented and applied to provide 'landmark' data of elite male and female swimmers in the variables governing swimming performance. Using this method intracyclic values of total and effective propulsive forces generated by moving limbs have been estimated. Intracyclic changes in instantaneous forward velocity of the centre of human's body masses were connected with certain cycle phases and explained by differences in instantaneous values of effective propulsive force ($F_{p(e)}(t)$) and force of frontal hydrodynamic resistance ($F_{r(f.d)}(t)$). High coefficients of propulsive efficiency ($e_p = 0.626–0.837$) among the elite swimmers studied were registered.

Key words: swimming, active hydrodynamical drag, mechanical power, propulsive efficiency.

Получено 13 октября 2008

Информация об авторе

Сергей Валентинович Колмогоров, зав. кафедрой спортивных дисциплин Поморского государственного университета имени М.В. Ломоносова, kolmogorov@pomorsu.ru