БИОМЕХАНИЧЕСКИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ОБРАЗОВАНИЯ СКОРОСТИ СИСТЕМЫ «ЛОДКА – ГРЕБЕЦ»

Н.Б. Сотский, канд. пед. наук, доцент,
Фариборз Мохаммади Пур

В статье рассматривается механизм образования скорости системы, имеющей переменную конфигурацию и находящейся в вязкой среде. Метод исследования – механико-математическое моделирование на основе подходов классической механики с использованием модели, состоящей из двух тел, расстояние между которыми может изменяться за счет внутренних сил системы. В ходе исследования установлен характер изменения скорости общего центра масс системы в зависимости от относительной скорости составляющих ее тел, а также от их масс и коэффициентов сопротивления. В работе получены данные, свидетельствующие о наличии критических соотношений указанных характеристик, при которых, несмотря на относительное движение частей системы, ее общий центр масс остается в состоянии покоя. Полученные в ходе исследования теоретические закономерности движения могут быть использованы для оптимизации техники водных видов спорта и совершенствования спортивного инвентаря.

Проблема рационального построения техники академической гребли, несмотря на кажущуюся внешнюю простоту этого физического упражнения, постоянно присутствует в научных исследованиях. При этом чаще всего рассматривается роль как внешних характеристик техники данного вида спорта, таких как темп, амплитуда и ритм гребли, так и параметров динамики, в частности, развиваемых гребцами усилий и энергетических характеристик [1, 2].

Подробное рассмотрение материалов научных исследований, связанных с биомеханическим обоснованием техники академической гребли, позволяет сделать заключение о существенных противоречиях результатов работ, вызванных, на наш взгляд, весьма произвольным использованием законов механики при объяснении особенностей техники. В частности, в ряде работ [3–7] движение гребца и лодки рассматривается как движение единой системы, в то время как внутренние силы (действующие на весла и подножку) – как причину возникновения ускорения всей системы. Рассматривают силы инерции, действующие на гребца в крайних точках фазы проводки без ведения понятия системы отсчета, ускорение которой, как известно, является единственной причиной возникновения таких сил [8]. Эти и некоторые другие противоречия при использовании методов биомеханики применительно к исследованиям техники академической гребли свидетельствуют об актуальности исследования, позволяющего на строгих принципах механики движения системы «гребец – лодка» обосновать закономерности образования движущих сил в рассматриваемом физическом упражнении.

Цель настоящей работы – исследование общих закономерностей образования скорости в академической гребле с представлением гребца и лодки в виде единой биомеханической системы.

Метод исследования – моделирование движения указанной системы на основе использования законов классической механики.

Исходной предпосылкой решения поставленной задачи было построение модели. Она представлялась состоящей из двух тел (тело гребца с веслами и лодка), которые взаимодействуют между собой, используя внутренние относительно рассматриваемой системы силы. Оба тела взаимодействуют с водной средой, сопротивление которой определяется в зависимости от скорости движения тела и коэффициента сопротивления. В результате противонаправленного относительного движения двух тел и разности сил сопротивления образуется сила, вызывающая движение системы.

Если не учитывать сопротивление воздуха, движение центра масс системы может быть описано в виде следующего уравнения:

$$M(dV_c/dt)=-C_1(dx_1/dt)|(dx_1/dt)|-C_2(dx_2/dt)|(dx_2/dt)| , \qquad (1)$$

где M – полная масса системы; V_c – скорость общего центра масс системы; X_1 – координата центра масс тела гребца; X_2 – координата центра масс лодки; C_1 и C_2 – соответственно коэффициенты сопротивления для движения лодки и весел в воде.

Решение данного уравнения имеет смысл при движении обоих тел, составляющих систему, в противоположных направлениях. В таком случае скорости центров масс обоих тел, составляющих систему (dx_1/dt) и (dx_2/dt), имеют различные знаки.

Если дополнительно конкретизировать зависимость взаимного перемещения тел системы от времени в виде линейной функции $S=q(t)$, то координаты центров масс оказываются связанными соотношением $X_2=X_1-q(t)$ и уравнение (1) может быть преобразовано к виду:

$$M(dV_c/dt)=-C_1(dx_1/dt)^2+C_2(dx_1/dt-q(t))^2 . \qquad (2)$$

Если учесть, что координата ОЦМ Xc в механике определяется из соотношения $MXc=m_1X_1+m_2X_2$, продифференцировать его по времени, а также использовать упомянутое выше соотношение $(X_2=X_1-q(t))$, можно получить выражение закона движения ОЦМ системы с учетом наложенных на нее связей:

$$d^2X_c/dt^2=A(dXc/dt)^2-B(dXc/dt)+D , \qquad (3)$$

где $A=(C_2-C_1)/M$; $B=2q(t)(m_1C_2+m_2C_1)$; $D=q^2(t)(m_1^2C_2-m_2^2C_1)$.

Таким образом, закон движения модели представляет собой нелинейное дифференциальное уравнение второго порядка. Решение этого уравнения имеет различный вид для разных зависимостей от времени расстояния между телами, составляющими систему. При исследовании техники академической гребли главный интерес представляет закон изменения скорости системы «лодка – гребец».

Для исследования этой характеристики обозначим V производную от координаты ОЦМ системы по времени. В результате ввода такой переменной получается следующее выражение для скорости ОЦМ системы «лодка – гребец»:

$$dV/dt=AV^2+B(t)V+D(t). \quad (4)$$

Для решения данного уравнения необходимо задание начальных условий, представляющих собой координату и скорость ОЦМ в начальный момент времени. В результате должны быть получены зависимости от времени для указанных характеристик двигательного действия.

Начальные условия отражают собой ситуацию, имеющую место в начале изучаемого движения. Так, при равенстве нулю координаты и скорости ОЦМ исследуется первый гребок, а при наличии скорости – последующие.

Вид решения уравнения (4) зависит от выражения закона изменения расстояния между телами, составляющими систему. В случае линейного закона (k=qt) уравнение может быть проинтегрировано в элементарных функциях [9]. При исследовании такого случая для начальных условий, предполагающих нулевую начальную координату и скорость общего центра масс системы, решение уравнения движения для скорости центра масс системы имеет следующий вид:

$$V=(q/M)(C_2m_1^2–C_1m_2^2)/[m_1C_2+m_2C_1+M(\sqrt{}C_1C_2)Cth[(qt\sqrt{}_1C_2)/M]]. \quad (5)$$

Для установления влияния описанных характеристик системы на устоявшуюся скорость ее движения можно рассмотреть наиболее характерные частные случаи. Так, если предположить, что время выполнения проводки не ограничено, скорость центра масс системы стремится к некоторому предельному значению:

$$V=(q/m)(C_2m_1^2–C_1m_2^2)/[m_1C_2+m_2C_1+M(\sqrt{}\ C_1C_2)]. \quad (6)$$

Если считать, что коэффициенты сопротивления равны, то предельное значение скорости, достигаемой общим центром масс системы, может быть выражено следующим соотношением:

$$V=q(m_1–m_2)/2M. \quad (7)$$

Из последнего выражения следует, что предельная скорость не ограниченного по времени гребкового движения определяется разностью масс взаимодействующих объектов, а также скоростью их относительного перемещения. Если предположить, что коэффициент сопротивления одного тела (например, имеющего массу m_2) превышает аналогичный коэффициент другого в N раз, предельную скорость движения системы в рассматриваемом случае можно представить в виде:

$$V=(q/m)(Nm_1^2–m_2^2)/(M\sqrt{}N+m_1N+m_2). \quad (8)$$

Если предположить, что массы тел равны, выражение для предельной скорости приобретает следующий вид:

$$V=(q/2)(C_2–C_1)/(2\sqrt{C_1C_2}+C_2+C_1). \quad (9)$$

В случае, если масса одного из тел, составляющих систему (например, m_1), превышает массу другого в S раз, выражение предельной скорости приобретает следующую форму:

$$V=q(C_2S^2–C_1)/(1+S)\sqrt{C_1C_2}+ SC_2+C_1). \quad (10)$$

Приведенные выражения позволяют анализировать общие закономерности движения системы сложной конфигурации при относительном перемещении тел, ее составляющих. Поскольку при осуществлении акта гребка основной интерес представляет исследование влияния указанных выше параметров на скорость ОЦМ системы, логично более подробно рассмотреть зависимость последней от изменения соотношения масс и коэффициентов сопротивления взаимодействующих тел.

Типичные зависимости скорости ОЦМ системы от времени представлены на рисунке 1. Они имеют криволинейную форму, соответствующую плавному увеличению скорости системы с течением времени с постепенным замедлением темпа ее нарастания и достижением насыщения. Величина установившейся скорости системы зависит от времени и таких параметров, как массы тел, их относительная скорость и коэффициенты сопротивления тел продвижению в водной среде. На этом же рисунке показано влияние быстроты относительного перемещения тел, составляющих систему, на установившуюся скорость движения ее ОЦМ.

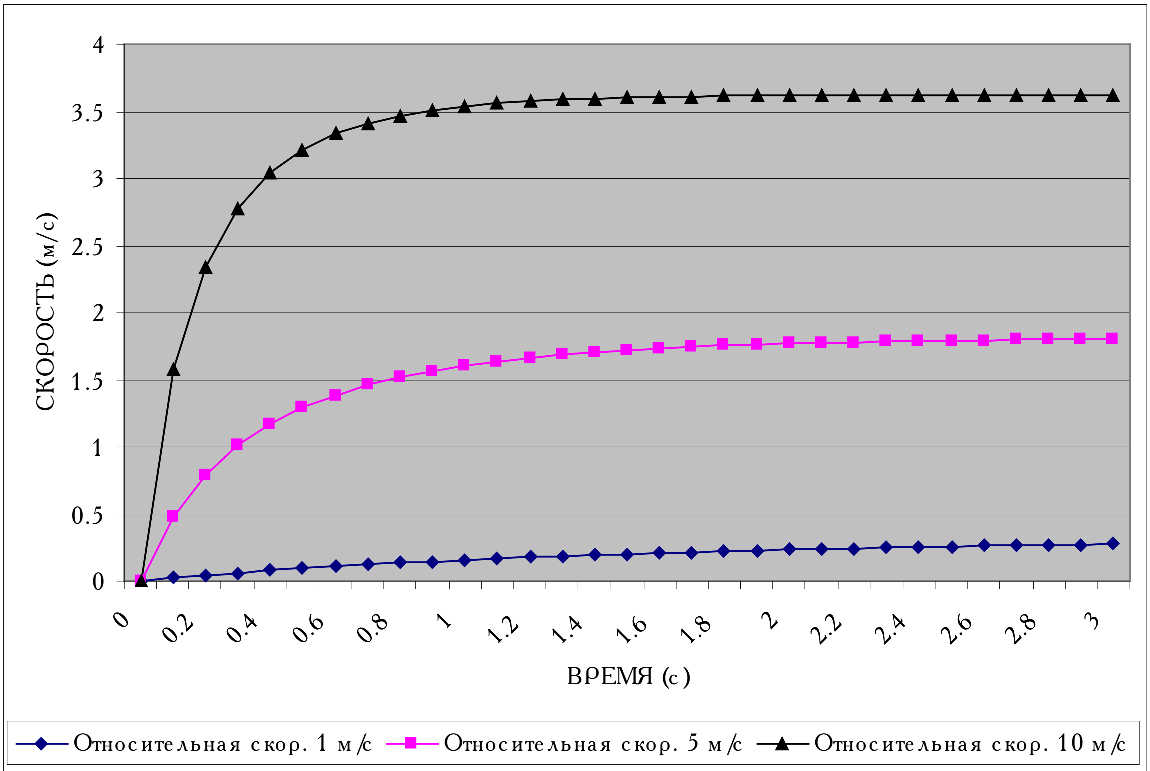

Рисунок 1 – Зависимость скорости перемещения ОЦМ системы от времени при различных значениях относительной скорости тел

Характерными чертами зависимости установившейся скорости ОЦМ от быстроты относительного перемещения составляющих систему тел являются ее существенное увеличение, а также укорочение времени достижения насыщения при более быстром изменении расстояния между указанными телами. В частности, при изменении скорости относительного движения тел в 5 раз скорость ОЦМ системы возрастает в 6,7 раза, а при возрастании скорости в 10 раз – соответственно в 13,3 раза Время достижения скорости насыщения имеет более сложную зависимость. Например, при увеличении быстроты относительного движения в 5 раз она уменьшается приблизительно на 1 секунду, а при увеличении в 10 раз – на 1,5 секунды.

Зависимость скорости движения ОЦМ системы от соотношения масс при равенстве коэффициентов сопротивления (C_1=C_2) представлена на рисунке 2.

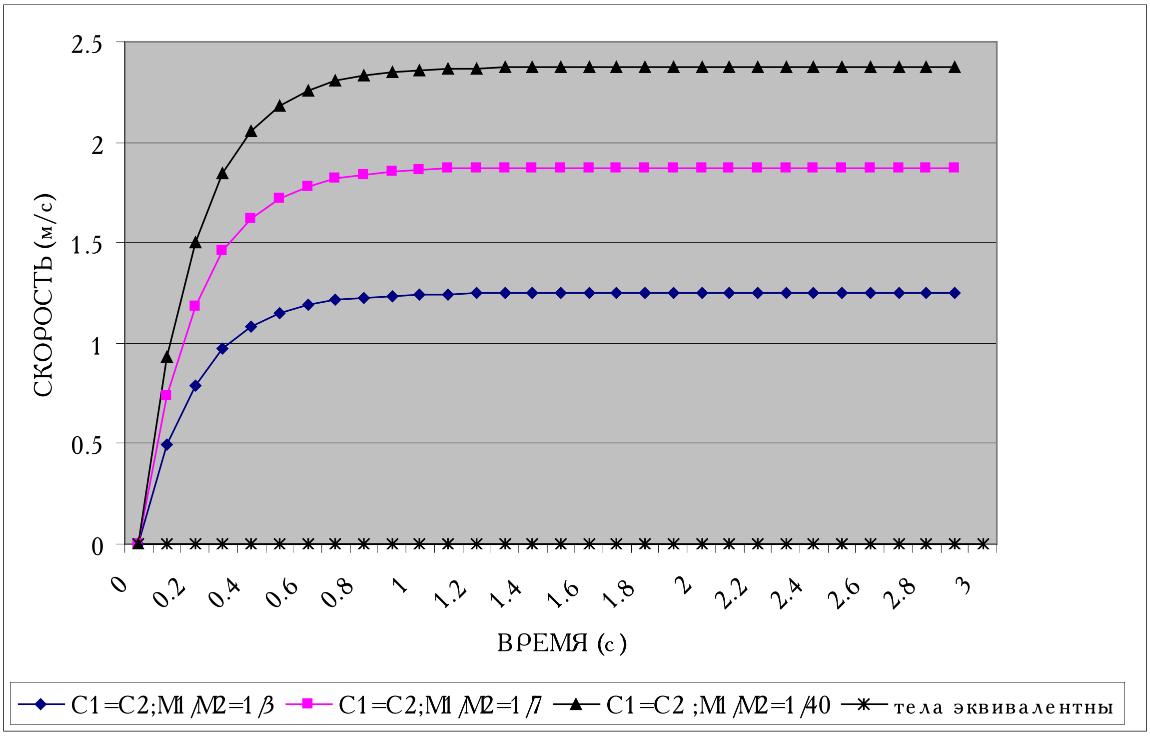

Рисунок 2 – Зависимость скорости ОЦМ системы от времени для различных соотношений масс взаимодействующих тел

Анализ представленной зависимости показывает, что при равенстве масс и коэффициентов сопротивления ОЦМ системы остается в покое. При появлении разности масс происходит некоторое возрастание скорости ОЦМ, причем чем больше разность масс, тем выше быстрота ее нарастания, а также максимальное установившееся значение. Так, при относительной скорости тел, составляющих систему, q=5 м/с и соотношении масс 1:3 установившаяся скорость ОЦМ системы составляет 1,25 м/с, а при соотношении 1:7 – 1,88 м/с.

Если предположить равенство масс (m_1=m_2), то зависимость скорости ОЦМ системы от соотношения коэффициентов сопротивления приобретает вид, представленный на рисунке 3.

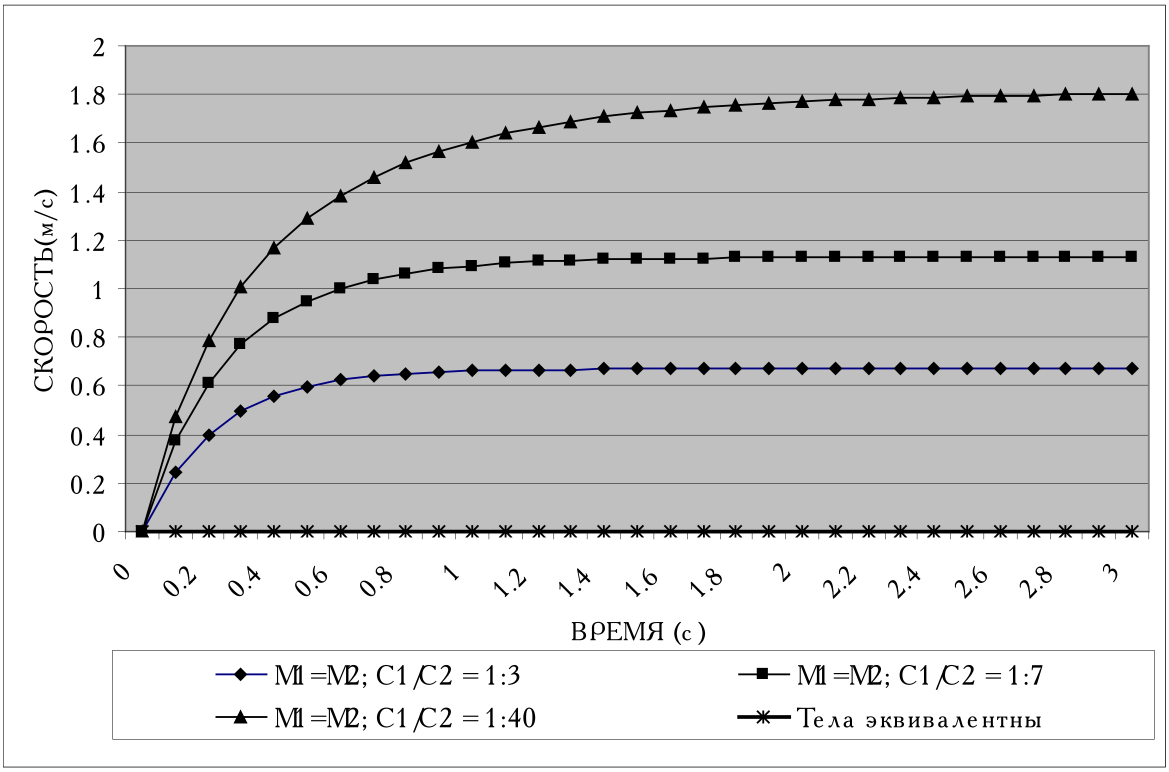

Рисунок 3 – Зависимость скорости ОЦМ системы от времени для различных соотношений коэффициентов сопротивления

Анализ зависимости скорости ОЦМ системы от времени в случае равенства масс показывает, что при увеличении разности коэффициентов сопротивления происходит увеличение установившейся скорости. Так, при изменении указанного соотношения от 1:3 до 1,7 происходит изменение указанной скорости от 0,67 до 1,13 м/с, а при отношении коэффициентов сопротивления 1:40 система разгоняется до 1,8 м/с. При увеличении разницы в коэффициентах сопротивления время достижения установившейся скорости несколько увеличивается. Иными словами, влияние изменения соотношения коэффициентов сопротивления в случае равных масс имеет тенденцию, аналогичную рассмотренной выше, для изменения соотношения масс при равенстве коэффициентов сопротивления.

Подробное рассмотрение полученных закономерностей позволяет установить и другие интересные тенденции. В частности, при постоянстве соотношения масс, составляющих систему тел, и коэффициента сопротивления одного из тел изменение коэффициента сопротивления второго тела приводит к постепенному уменьшению скорости ОЦМ системы вплоть до нулевого значения и последующему изменению направления движения. Такая ситуация графически представлена на рисунке 4.

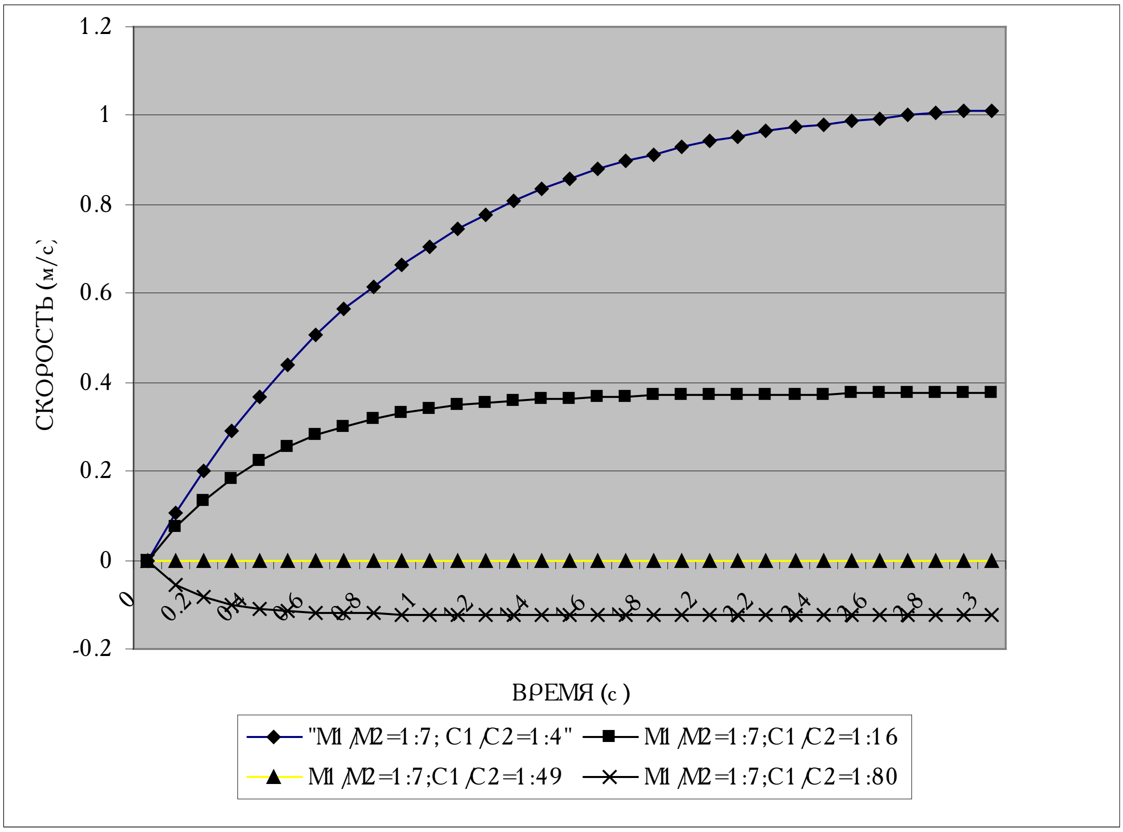

Рисунок 4 – Динамика изменения скорости ОЦМ системы
при неограниченном увеличении коэффициента
сопротивления одного из тел

Здесь в качестве исходных данных принято значение относительной скорости q=5 м/с, соотношения масс 1:7 и коэффициентов сопротивления 1:4. При дальнейшем увеличении соотношения коэффициентов сопротивления происходит уменьшение установившейся скорости перемещения ОЦМ системы вплоть до нуля (при отношении 1:49) и дальнейшее изменение направления движения ОЦМ при уменьшении рассматриваемого отношения. Соотношение масс и коэффициентов сопротивления, при которых ОЦМ системы остается в покое, несмотря на относительные движения составляющих ее тел, логично назвать критическими.

Заключение. Исследование закономерностей образования скорости системы, состоящей из двух тел, взаимодействующих с вязкой средой, показало, что перемещение ОЦМ указанной системы возникает благодаря относительному движению тел при условии различия их масс и коэффициентов сопротивления.

Изменение скорости ОЦМ может достигаться следующими путями:

– изменением скорости относительного движения тел, составляющих систему;

– изменением разности их масс;

– изменением коэффициентов сопротивления.

При изменении скорости относительного движения тел, составляющих систему, происходит изменение не только абсолютного значения установившейся скорости ОЦМ, но и темпа ее достижения, причем при более быстрых относительных движениях она достигается за существенно более короткие промежутки времени.

Существуют критические соотношения масс и коэффициентов сопротивления, при которых относительное движение тел, составляющих систему, не приводит к перемещению ее ОЦМ. Изменение указанных соотношений по отношению к критическим значениям приводит к образованию скорости ОЦМ системы, определяя ее величину и направление.

Полученные аналитические закономерности позволяют оценить механизм перемещения системы тел переменной конфигурации, находящейся в вязкой среде, что позволяет не только понять закономерности образования скорости в целом ряде водных видов спорта, но и при дальнейшем развитии темы оценить возможные направления оптимизации техники в различных видах гребли и плавании.

1. Демьянов, И.Я. Техника гребли / И.Я. Демьянов. – М.: ФИС, 1969. – 168 с.

2. Дубровский, В.И. Биомеханика: учебник для сред. высш. учеб. заведений / В.И. Дубровский, В.Н. Федорова. – М.: ВЛАДОС-ПРЕСС, 2003. – С. 414–416.

3. Иссурин, В.Б. Биомеханика гребли на байдарках и каноэ / В.Б. Иссурин; под ред. В.М. Зациорского. – М.: Физкультура и спорт, 1986. – 112 с.

4. Кирсанов, В.А. Техника и биомеханика академической гребли / В.А. Кирсанов, В.В. Клешнев. – СПб.: НИИФК, 1996. – 50 с.

5. Kleshnev, V. Power in Rowing / V. Kleshnev // International Research in Sports Biomechanics / edited by J. Hong. – Routledge, 2002. – P. 224–230.

6. Kleshnev, V. Moving the rowers / V. Kleshnev // Biomechanical background. Australian rowing. – V. 25(1), May. 2002. – P. 16–19.

7. Sanderson, B. Towards optimizing rowing technique / B. Sanderson, W. Martindale // Medicine and science in sports and exercise. – 1986. – V. 18. – P. 454–468.

8. Хайкин, С.Е. Физические основы механики / С.Е. Хайкин. – М.: Наука, 1971. – С. 332–397.

9. Бычков, Ю.А. Таблицы неопределенных интегралов / Ю.А. Бычков, О.И. Маричев, А.П. Прудников. – М.: Наука, 1986. – 192 с.