

ВЛИЯНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА СКОРОСТЬ ДВИЖЕНИЯ ЛОДКИ В АКАДЕМИЧЕСКОЙ ГРЕБЛЕ

Вабищевич А.С.

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
Минск, Республика Беларусь*

Малевич В.Л. – профессор кафедры физики,
доктор физ.-мат. наук

Аннотация. Академическая гребля – циклический вид спорта, где продвижение лодки, вместе с гребцом и веслами, обеспечивается за счет повторяющегося отталкивания лопастью весла от воды. Спортсмены находятся в лодках и гребут веслами, используя мышцы спины, рук и ног. В работе проанализировано движение гребца и лодки, используя законы физики, определены факторы, влияющие на скорость движения лодки.

Ключевые слова. Физика, академическая гребля, техника, движение, сопротивление, сила тяжести, сила Архимеда, эргометр «Concept-2», сопротивление, рычаг.

Введение

Академическая гребля – циклический вид спорта, где продвижение лодки, вместе с гребцом и веслами, обеспечивается за счет повторяющегося отталкивания лопастью весла от воды. Спортсмены находятся в лодках и гребут веслами, используя мышцы спины, рук и ног. Это один из немногих видов спорта, в котором спортсмен задействует около 95% мышц всего тела. Стандартная длина дистанции – 2000 метров.

Современные академические лодки делятся на распашные и парные. В парных спортсмен гребет двумя веслами, а в распашных – одним. Парные классы лодок – это одиночки, двойки и четверки. Распашные – двойки, четверки, восьмерки.

Различны размеры и масса лодок. Самая легкая и маленькая – одиночка. Масса её вместе с уключинами не превышает 14 кг, длина 5 метров. Самая внушительная по размерам – восьмёрка, её масса 110 кг, длина около 20 метров. Скорость движения лодок достигает до 20 км/ч (средне-ходовая для 8+) и до 30 км/ч (на «рывках» (старт/финиш)). Самыми скоростными лодками считаются восьмерки.

В работе проанализировано движение гребца и лодки, используя законы физики, определены факторы, влияющие на скорость движения лодки, проведен анализ полученных данных.

Основная часть

Техника, которую использует спортсмен для перемещения лодки, должна быть оптимизирована для того, чтобы эффективно использовать свои мышцы для положительного перемещения лодки и минимизировать отрицательное воздействие силы. Эта оптимизация позволяет создать максимальную скорость на 2000 метров. Спортсмен во время прохождения дистанции делает 220-250 гребков. Маленькая потеря скорости в течение каждого гребка приводит к тому, что лодка имеет более низкую среднюю скорость и меньше перемещается по воде за один гребок. Например, сокращение проката лодки на 10 см за один гребок, приводит к потерям на 2000-метровой дистанции в 25 метров.

Длина перемещения в течении каждого гребка зависит от многих параметров: силы, создаваемой спортсменом; эффективности техники гребли; установленного рычага; силы трения, сопротивления корпуса лодки в воде; химического состава воды и т.д.

В академической гребле продвигающая сила действует периодически, т.к. весло движется в воде с применением, а над водой, без применения движущей силы. В течение цикла гребка, когда весла погружены в воду, гребец перемещает свою основную массу на банке к носу лодки, скользя по полозкам, и за счет собственных мышц передает усилие на рукоятки весел, таким образом, создает как положительную, так и отрицательную силу. Положительная сила заставляет лодку продвигаться вперед, а отрицательная препятствует этому продвижению (рисунок 1).



Рисунок 1 – Направление сил в гребле

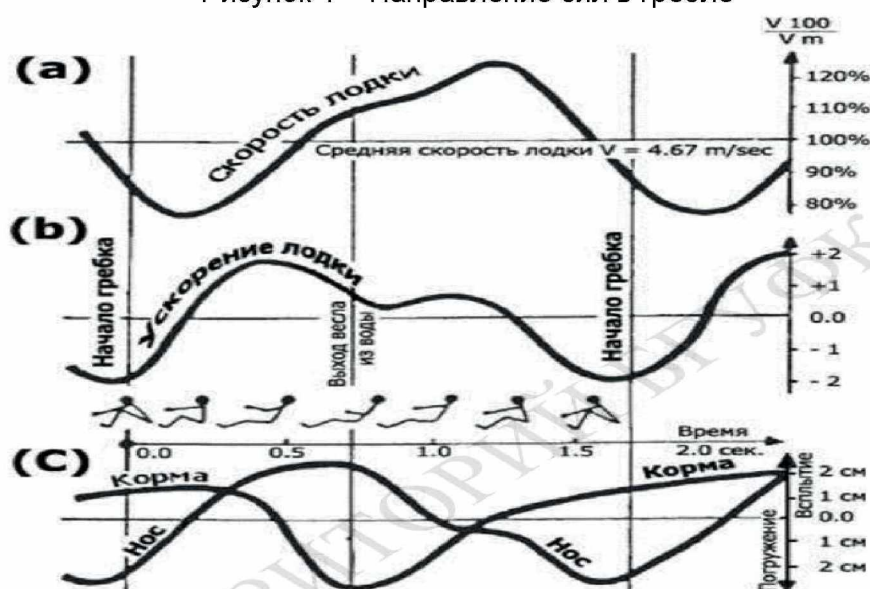


Рисунок 2 – Диаграмма изменения кинематических показателей техники гребли академической

Кривая (а) скорости лодки демонстрирует скоростное изменение лодки в течение одного гребка. Относительно средней скорости можно использовать эту кривую для анализа техники гребли. Хорошая техника имеет меньше изменений от средней скорости, а характеристика самой кривой не изменяется.

Кривая (b) показывает ускорение лодки. Лодка достигает максимальное ускорение в момент гребка и минимальное в течение подъезда. Схематичные фигуры спортсмена, расположенные ниже кривой (b), демонстрируют его позицию в течение цикла гребка и относительно времени в секундах.

Кривая (c) качки носа и кормы лодки демонстрирует продольное колебание лодки. Две кривые показывают величину вертикальной качки носа и кормы лодки.

Анализ будет сосредоточен на кривой (а) изменения скорости лодки и на схематичных фигурах атлета, которые он принимает в течение цикла гребка, изображенных на рисунке 2.

На диаграмме видно, что максимальная скорость лодки достигается в момент извлечения весла из воды, а минимальная скорость при опускании весла в воду.

В течение всего периода гребка вес тела атлета перемещается от носа к корме (рисунок 3). Например, в мужской восьмерке со средним весом у атлета 85 килограммов, мы имеем 680 килограммов массы, которые во время подъезда двигаются с носа лодки на корму.

Если считать, что $\text{МАССА} + \text{ДВИЖЕНИЕ} = \text{СИЛА}$, возникает вопрос: куда идёт эта сила?

Когда спортсмен делает гребок, его масса, которая движется на корму, должна остановиться и изменить направление своего движения. Вся эта сила направлена против движения лодки и передается через опору ногами на подножку (см. позицию А, на рисунке 3). Во время конца гребка происходит противоположное: масса двигается в сторону носа и не мешает свободному перемещению лодки. Единственный способ уменьшить влияние отрицательной силы во время захвата воды – это правильно делать захват (вход весла в воду), (см. позицию В, на рисунке 3).

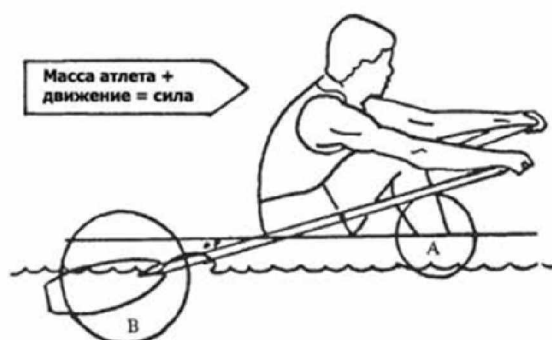


Рисунок 3 – Точки соприкосновения

Непрерывное приложение силы на рукоятку весла, создает давление лопасти весла на воду по дуге движения лопасти в воде. Обратная реакция воды на лопасть весла создает силу, которая передается через вертлюг на корпус лодки [1].

Сила, которая прикладывается к рукоятке весла и создается на лопасти, имеет две составляющие: сила, которая идет на продвижение лодки, и сила (угловая), которая идет на сжатие или растяжение лодки в поперечном направлении. Составляющая продвигающей силы возрастает от момента захвата веслом воды до момента, когда весло достигнет 90 градусов по отношению к корпусу лодки. В этот момент вся сила идет исключительно на продвижение лодки.

Эффект продвигающих и угловых сил определяет угловое перемещения весла, в которых атлет может использовать свою силу эффективно. Превышение эти углов поворота приводит к увеличению угловой силы и снижению продвигающей силы. Таким образом, весло наиболее эффективно в продвижении лодки, когда оно работает в углах близких к 90 градусам. Эти компоненты силы проиллюстрированы на рисунке 4 [2].

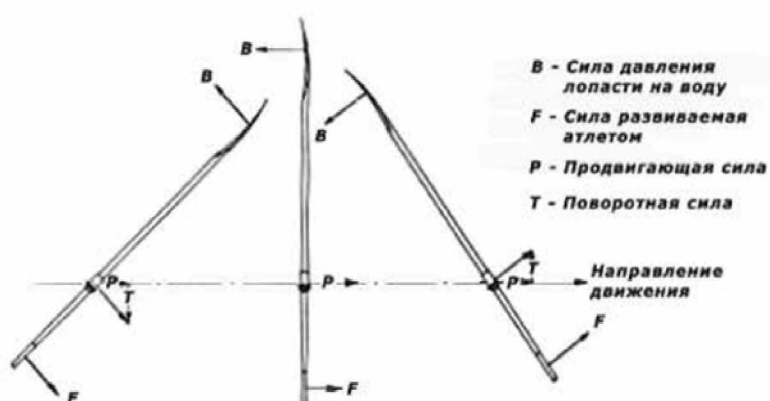


Рисунок 4 – Продвигающие и поворотные силы

Для лодок существуют различные типы сопротивления: вязкое сопротивление, сопротивление формы, волновое сопротивление. Гоночные лодки отличаются тем, что основным источником сопротивления (около 80%) является сопротивление трения. Воздух

также вносит свой вклад в общее сопротивление. Скорость воздуха изменчива, поэтому вклад может возрасти от нескольких до 10% при сильном встречном ветре.

В зависимости от направления ветра сила сопротивления может, как помочь гребцу, так и сильно помешать. Поэтому важным становится такое действие, как разворот лопасти весла посредством прокрутки рукояти: из вертикального положения меняется в горизонтальное. Когда лодка идёт по ветру, лопасти нужно разворачивать как можно раньше, что в свою очередь повысит парусность весла – придаст дополнительную скорость. Так же это увеличит устойчивость лодки, из-за поддержания одинакового расстояния лопастей от воды. То же самое и наоборот. Когда лодка идёт против ветра, нужно как можно позже разворачивать лопасти, так уменьшается парусность, что в свою очередь сохраняет потери скорости.

Размер и форма корпуса лодки определяются изготовителем. Более глубокий и более узкий корпус лодки создает меньше сопротивления при движении в воде, чем широкая лодка, но узкий корпус – менее устойчив. Глубина погружения любого корпуса устанавливается изготовителем на стадии проекта и основывается на весе команды, которая будет в нем грести. Оптимальную глубину погружения называют «разработанной водной линией» (оптимальная ватерлиния) – положение, когда лодка находится в равновесии во всех направлениях. Корпус лодки, погруженный до этой расчетной ватерлинии, имеет самое низкое сопротивление. Фактическая глубина погружения может измениться, если фактический вес экипажа не соответствует предназначенному весу команды для данной лодки (погружение лодки изменяется в среднем на 1 мм для каждых 10-кг), что приведет к уменьшению эффективности работы лопасти весла [3].

Глубина погружения любого корпуса устанавливается изготовителем на стадии проекта и основывается на весе команды, которая будет в нем грести. Оптимальную глубину погружения называют «разработанной водной линией» (оптимальная ватерлиния) – положение, когда лодка находится в горизонтальном положении как с носа на корму, так и с правого борта на левый. Если не соблюдать характеристики/рекомендации по весу, указанные на лодке, спортсмен не сможет показать свой максимальный результат. Это становится понятным из рассмотренных ниже примеров.

Нулевая отметка (оптимальная ватерлиния) – уровень лодки на воде/по отношению к воде, на котором она должна находиться, чтобы условия плавания сохранялись ($F_{\text{тяжести}} = F_{\text{Архимеда}}$).

Пусть m' – масса гребца, согласно характеристике лодки.

1 случай, когда вес гребца, больше заявленного на лодке. В этом случае сила тяжести будет больше чем должна, а значит лодка «тонет» – находится ниже нулевой отметки, что в свою очередь создаёт дополнительную силу трения:

$$F_{\text{тяж1}} = (m' + m_{\text{гребца1}}) \cdot g > F_{\text{тяж2}} = m' \cdot g \Rightarrow F_{\text{тяж}} > F_{\text{Архимеда}} \quad (1),$$

где $F_{\text{тяж1}}$ – реальная сила тяжести, $F_{\text{тяж2}}$ – теоретическая сила тяжести, $m_{\text{гребца1}}$ – избыточная масса гребца.

2 случай, когда вес гребца меньше заявленного на лодке. В этом случае сила тяжести будет меньше чем должна, а значит лодка «всплывает», находится выше нулевой отметки, из-за чего снижается КПД усилия гребца.

$$F_{\text{тяж1}} = (m' - m_{\text{гребца1}}) \cdot g < F_{\text{тяж2}} = m' \cdot g \Rightarrow F_{\text{тяж}} < F_{\text{Архимеда}} \quad (2),$$

где $F_{\text{тяж1}}$ – реальная сила тяжести, $F_{\text{тяж2}}$ – теоретическая сила тяжести, $m_{\text{гребца}}$ – масса гребца.

3 случай, когда вес гребца равен заявленному на данной лодке. В этом случае сила тяжести равна той, какая должна быть, а значит лодка «плавает» – находится на нулевой отметке, из-за чего максимальное КПД усилия гребца.

$$F_{\text{тяж1}} = m' \cdot g = F_{\text{тяж2}} = m' \cdot g \Rightarrow F_{\text{тяж}} = F_{\text{Архимеда}} \quad (3),$$

где $F_{\text{тяж1}}$ – реальная сила тяжести, $F_{\text{тяж2}}$ – теоретическая сила тяжести.

В зимнее время подготовка гребцов осуществляется в залах, большую часть времени на эргометрах «Concept-2». Они предоставляют огромное количество возможностей для различных тренировок, измерений.

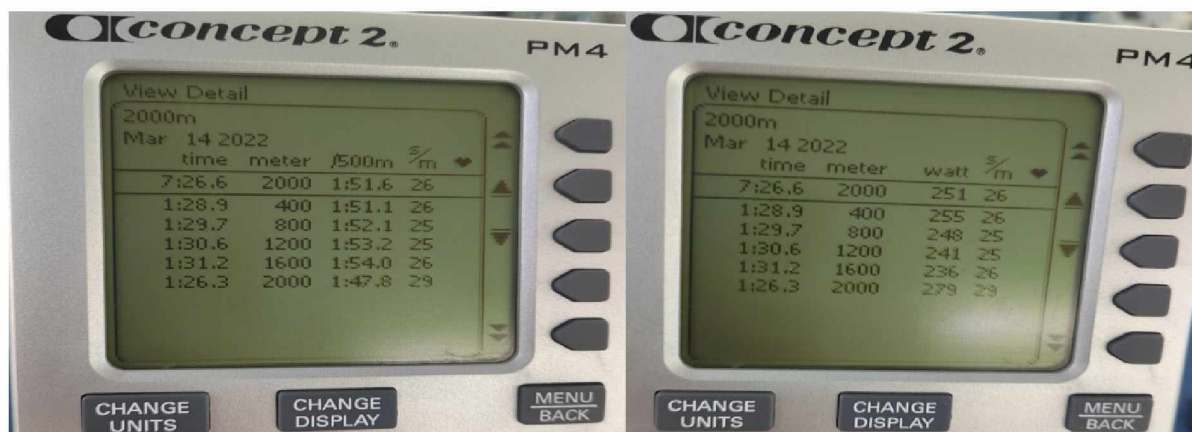


Рисунок 5 – Прохождение дистанции 2000м на эргометре

Экспериментальным путем была вычислена сила, которую должен прикладывать спортсмен, чтобы пройти дистанцию в 2000 метров, развивая 250 Вт мощности (рисунок 5). Для удобства расчётов было принято решение округлить полученные данные: 251Вт ≈ 250 Вт, 7 мин 26.6 сек = 446.6 сек ≈ 450 сек.

$$P = \frac{F_{\text{гр.}} \cdot S}{t} \Rightarrow F_{\text{гр.}} = \frac{P \cdot t}{S} = \frac{250 \text{ Вт} \cdot 450 \text{ с}}{2000 \text{ м}} = 56,25 \text{ Н} \approx 56 \text{ Н} \quad (4)$$

$$\Delta v = \frac{S}{t} = \frac{2000 \text{ м}}{450 \text{ с}} = 4,4 \text{ м/с} \quad (5)$$

где P = 250 Ватт – мощность, которая была развита во время прохождения дистанции (*все измерения были выполнены на гребном эргометре); t = 450 сек – полученное время; S = 2000 метров – дистанция; F – сила каждого гребка; Δv – средняя скорость прохождения дистанции.

Получается, что 56 Ньютонов – это та сила, которую гребец тратит на один гребок, развивая 250 Ватт мощности.

Если бы движению лодки не препятствовало действие воды и воздуха, то лодка двигалась бы равномерно и прямолинейно неограниченно долго. Силу сопротивления о воду можно рассчитать, используя формулу для расчёта силы вязкого сопротивления:

$$F_c = k \cdot v \quad (6)$$

где k – коэффициент вязкого сопротивления; v – скорость движения.

Уравнение динамики движения лодки имеет вид:

$$m \cdot \frac{dv}{dt} = F_{\text{т.гр.}} - k \cdot v \quad (7)$$

где m – суммарная масса лодки; $\frac{dv}{dt}$ – производная скорости по времени; F_{т.гр.} – сила тяги гребца; k – коэффициент вязкого сопротивления; v – скорость движения.

Суммарная масса лодки равна:

$$m = m' + m_{\text{л}} = 67 \text{ кг} + 14 \text{ кг} = 81 \text{ кг} \quad (8)$$

где m' = 67кг – масса моего тела; m_л = 14 кг – масса лодки.

Пусть стационарная скорость лодки v_0 . Так как время движения лодки в стационарном режиме на порядок превышает время разгона, то время разгона можно считать незначительным. Следовательно, стационарная скорость движения лодки равна значению средней скорости прохождения дистанции. Из уравнения (7) находим расстояние S , которое лодка проходит по инерции при $F_{т.гр.} = 0$:

$$m_{л} \cdot \frac{dv}{dt} = -k \cdot v \quad (9)$$

где m – суммарная масса лодки; $\frac{dv}{dt}$ – производная скорости по времени; k – коэффициент вязкого сопротивления; v – скорость движения.

Используя подстановку $\frac{dv}{dt} = v \cdot \frac{dv}{dS}$, получаем $m_{л} \cdot v \cdot \frac{dv}{dS} = -k \cdot v$. Преобразовывая последнее равенство, получаем $\frac{dv}{dS} = -\frac{k}{m}$.

Решением уравнения является функция:

$$v(S) = v_0 - \frac{k \cdot S}{m} \quad (10)$$

где v_0 – стационарная скорость движения; m – суммарная масса лодки; k – коэффициент вязкого сопротивления; S – путь, пройденный по инерции.

После остановки лодки функция (9) переписывается следующим образом:

$$v(S) = v_0 - \frac{k \cdot S}{m} = 0 \quad (10')$$

где v_0 – стационарная скорость движения; m – суммарная масса лодки; k – коэффициент вязкого сопротивления; S – путь, пройденный по инерции.

Используя функцию (10') выражаем k – коэффициент вязкого сопротивления:

$$k = \frac{m \cdot v_0}{S} \quad (11),$$

где v_0 – стационарная скорость движения; m – суммарная масса лодки; S – путь, пройденный по инерции.

Экспериментальным путём находится S – путь, пройденный по инерции = м. Подставляя значения в формулу (11) находим k :

$$k = \frac{m \cdot v_0}{S} = \frac{81 \text{ кг} \cdot 4,4 \text{ м/с}}{32,5 \text{ м}} \approx 10,97 \text{ кг/с} \quad (11)$$

Тогда подставляя значение коэффициента вязкого сопротивления k в формулу (6) получаем значение силы сопротивления о воду:

$$F_c = k \cdot v = 10,97 \text{ кг/с} \cdot 4,4 \text{ м/с} = 48,268 \text{ Н} \approx 48 \text{ Н} \quad (12).$$

Эффективность весла, действующего как рычаг (рисунок 6), зависит от величины выноса, соотношения внешнего и внутреннего рычага. Рычаг используется для получения большего усилия на коротком плече с помощью меньшего усилия на длинном плече [4]. Прикладывая силу в 56 Н на меньшее плечо, было получено значение силы в 25 Н на большем.

$$F_{в.} \cdot L_1 = F_{т.} \cdot L_2 \Rightarrow 1,96 \text{ м} \cdot F_{в.} = 56 \text{ Н} \cdot 0,86 \text{ м} \Rightarrow F_{в.} = 56 \text{ Н} \cdot 0,86 \text{ м} / 1,96 \text{ м} \approx 25 \text{ Н} \quad (13),$$

где $F_{т.} = F_{тяги}$ – сила каждого гребка; $F_{в.} = F_{весла}$ – сила весла; L_1, L_2 – плечи приложения сил.

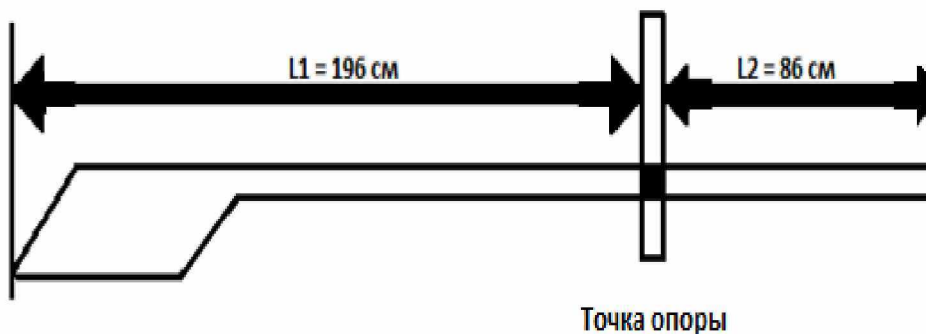


Рисунок 6 – Рычаг весла

Заключение

Определены физические факторы, влияющие на скорость движения лодки в академической гребле. К таким факторам относятся: силы, создаваемые гребцом; эффект продвигающих и угловых сил при повороте весла; вязкое сопротивление, сопротивление формы, волновое сопротивление; установленный рычаг весла. Учитывая влияние рассмотренных в работе физических явлений, можно добиться повышения скоростных показателей на практике.

Список использованных источников:

1. Жуков, С. Е. Искусство быть тренером по гребле академической : пособие / С. Е. Жуков, О. А. Тарасова, В. А. Загоровский ; Белорус. гос. ун-т физ. культуры. – Минск : БГУФК, 2021. – 91 с.
2. Искусство быть тренером : [по материалам программы обучения тренеров ФИСА]. Уровень 1. – Пинск, 2014. – 100 с.
3. Искусство быть тренером : [по материалам программы обучения тренеров ФИСА]. Уровень 2. – Пинск, 2014. – 94 с.