

ПРОБ. 1980

АКАДЕМИЯ НАУК УССР
ИНСТИТУТ БИОЛОГИИ ЮЖНЫХ МОРЕЙ
им. А. О. КОВАЛЕВСКОГО

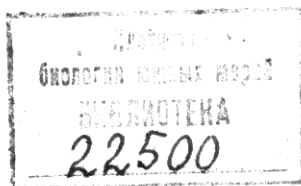
ПРОВ 98

ПРОВ 2010

БИОЛОГИЯ МОРЯ

вып. 16

ФУНКЦИОНАЛЬНО-
МОРФОЛОГИЧЕСКИЕ
ИССЛЕДОВАНИЯ НЕКТОННЫХ
ЖИВОТНЫХ



ИЗДАТЕЛЬСТВО «НАУКОВА ДУМКА»
КИЕВ — 1969

Суворов Е.К. Основы ихтиологии. "Советская наука",
Л., 1948.

Чернавин В.В. Происхождение брачного наряда у лососей.
Пр., 1921.

Шмидт П.Ю. Миграции рыб. Изд-во АН СССР, М. - Л., 1947.

О СОПРОТИВЛЕНИИ ВОДЫ ДВИЖЕНИЮ РЫБ *

А.Ф. Кудряшов

Географическое общество СССР

Проведенные исследования / Rosen , 1961; Walters, 1962/ свидетельствуют о том, что рыбы плавают при турбулентном режиме обтекания их тела водной средой. Исследованиями Роузена / Rosen , 1961/ в продольном канале с покрытым инъецированным слоем молока дном удалось установить следующее:

а/ двигающаяся с установившейся скоростью 46 и 59 см/сек рыба / *Brachydonio albolineatus*/ извивалась между вертикальными вихрями - возмущениями, начинающимися вблизи жабр; при этом во впадинах искривленного тела рыбы располагались три синхронно работающих с телом вихря;

б/ не перемещающиеся центры вихрей располагались по траектории головы рыбы; между центрами вихрей в следе наблюдалось медленное течение, перпендикулярное направлению движения рыбы;

в/ в волнообразном следе рыбы каждый вихрь медленно вращался, увеличивая амплитуду волн.

Установлено, что рыба плыет при турбулентном режиме не только за счет работы хвостового плавника, отталкивающегося от вихрей, но и за счет движения тела. Совершенно аналогичные явления наблюдаются в спонтанно сформированных турбулентным потоком руслах рек и их лабораторных моделях с тем лишь отличием, что в этом случае крупные вихри - возмущения располагаются горизонтально /Маккаеве, Коновалов, 1939; Кудряшев, 1959/.

* Печатается в дискуссионном порядке.

Рассматривать плавание рыб как обтекание тонкой плоской гладкой пластины при нулевом угле атаки возможно только в общем виде. Теоретическое решение Блазиуса / Blasius, 1908/, основанное на законе сохранения количества движения, позволило получить для ламинарного и турбулентного режимов обтекания такой пластины выражение

$$C_x = A \cdot \left(\frac{V_{max} \cdot L_n}{\nu} \right)^{-m},$$

/1/

- где C_x - коэффициент сопротивления трения;
 A - безразмерный коэффициент;
 V_{max} - наибольшая скорость набегающего потока;
 L_n - длина пластины;
 ν - кинематический коэффициент вязкости воды.

Отношение $Re = \frac{V_{max} L_n}{\nu}$ - число Рейнольдса.

Вычисления показывают, что большинство обследованных нами рыб /см. таблицу/ при наибольших скоростях плавания перемещаются при ламинарном режиме обтекания, т.е. при числах Рейнольдса $Re = \frac{V_{max} L_n}{\nu} < 500000$ /Патрашев, 1953; Яблонский, 1961/. Однако исследования с помощью ультрамикроскопса и других высокочувствительных приборов /Карман, 1936; Дель-Нунцио, 1936; Фей Тоуненд, 1936; Lin, Moulton, Putnam 1953; Шлихтинг, 1956/ показывают, что при ламинарном режиме движения текучей среды в пограничном слое около обтекаемого тела и в трубах сохраняется вихревой поток, вызывающий пульсации давления. Наличие вихревого потока в пограничном слое при ламинарном режиме объясняется /Карман, 1936/ молекулярно динамическими силами. Эти силы начинают действовать в тот момент, когда скорость потока в пограничном слое становится большей нуля /Карман, 1936/ за счет переноса количества движения молекулами текучей среды.

Пульсация вихревого потока в пограничном слое при ламинарном режиме наблюдалась /Дель-Нунцио, 1936/ при средних скоростях потока, близких к нулю, а измерение их было возможно при средней скорости воздуха в трубе 15 см/сек /рис. 1/. Обработанные нами результаты измерений Дель-Нунцио для воздушного потока в трубе и для обтекания этим потоком препятствия позволили установить зависимость в виде

$$N = 10 \cdot \sqrt{V_{cp}},$$

/2/

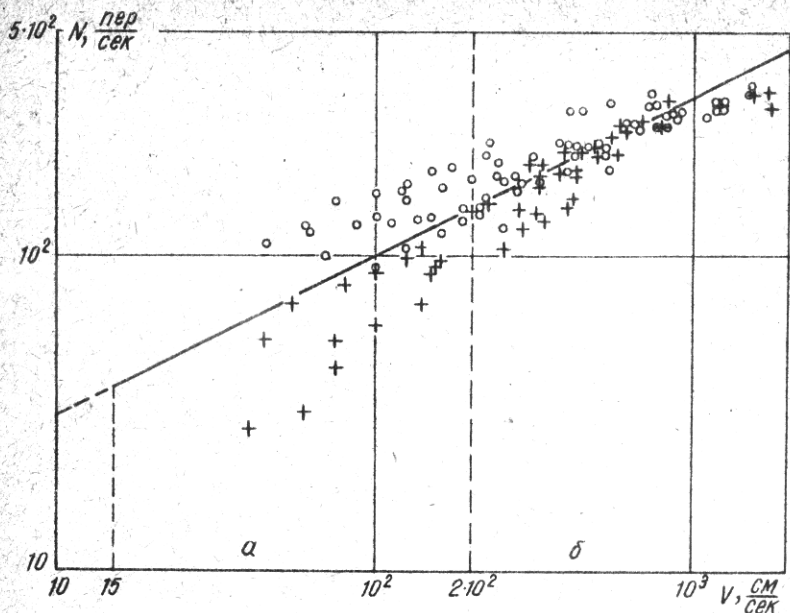


Рис. 1. Зависимость частоты возникновения вихрей от средней скорости потока при ламинарном /а/ и турбулентном /б/ режимах течения:

(о) - позади круглого цилиндра, обтекаемого потоком; (+) - в пограничном слое потока в трубах разного поперечного сечения /измерения Дель-Нунцио/.

где N - частота пульсаций /периодов в секунду/ на расстоянии $0,17 + 0,28$ мм от стенки трубы /2/ и частота вихрей в следе за препятствием /1/; $V_{\text{ср}}$ - средняя скорость воздушного потока. Из зависимости /2/ следует, что при переходе ламинарного режима в турбулентный в пограничном слое потока не наблюдается скачка, как это имеет место для всего потока в целом /Патрашев, 1953/. Такое явление можно объяснить, если этот же график /рис.1/ рассматривать как теоретически выводимую из уравнений Эйлера-Стокса зависимость между полной удельной энергией вихревых образований в пограничном слое потока и

силой вязкости. В качестве полной удельной энергии вихревых образований в пограничном слое принято произведение с размерностью см/сек :

$$\left(\frac{u^2}{2g} + h\right) \cdot n \cdot N, \quad /3/$$

где u - скорость перемещения вихревых образований;
 g - ускорение силы тяжести; $\frac{u^2}{2g}$ - удельная кинетическая энергия вихревых образований; h - их удельная потенциальная энергия; n - число вихревых образований. Отмечено / Кудряшов, 1959/, что с увеличением кинетической энергии вихревых образований в пограничном слое их потенциальная энергия уменьшается, т.е. наблюдается равновесие полной энергии пограничного слоя с ростом динамической характеристики потока. Сила вязкости /Карман, 1936 /потока пропорциональна выражению с равномерностью см²/сек²:

$$\frac{V_{ср}}{D} \cdot \nu, \quad /4/$$

где D - диаметр трубы.

С помощью ультрамикроскопа наблюдались не только пульсации в пограничном слое, но и поперечные перемещения вихревых образований в нем /Фейдж, Тоуненд, 1936/. Поперечные перемещения вихревых образований наблюдаются и не спонтанно образованных турбулентным потоком поверхностях: например, в руслах рек - в придонном слое по подвальям сползающих по течению гряд при поперечных течениях /Кудряшов, 1959/, у рыб - за бегущими по чешуйной поверхности волнами зигзагообразно двигаются и вихревые образования, так как тело рыб испытывает вращательные движения вокруг продольной оси /Magnan, Sainte-Laguë, 1929/. *

Вышеизложенные обоснования позволяют сделать заключение, что обтеканием рыб потоком воды управляют те же закономерности которые свойственны обтеканию спонтанно сформированных трубо-

* В работе, на которую ссылается автор /Magnan, Sainte-Laguë 1929/, существование этих вертикальных движений инстинктивно не показано, в силу чего все нижеследующие теоретические построения автора следует считать гипотетическими /Прим.ред./.

летним потоком поверхностей и тел /Кудряшев, 1959/. Под спонтанно сформированными турбулентным потоком телами понимаются тела, форма и поверхность которых деформируется синхронно с турбулентными возмущениями обтекающей их вязкой среды. При этом динамически установившиеся образования на поверхности такого тела остаются при стационарном режиме движения неизменными. Такие поверхности имеют побочни в руслах рек /гряды/, дюны в пустынях /барханы/, сугробы снега, облака, ветровые волны на поверхности воды, перья птиц, чешуя рыб и др. Этим поверхностям свойственна определенная концентрация инородных частиц /песок, кристаллы снега, капли воды, частицы слизи у рыб, "пудра" у птиц и др./ на границе раздела с текучей средой, которые отделяются от поверхности тела в поток за счет сил турбулентного перемещения /Кудряшев, 1959/. Спонтанно сформированные поверхности и тела обеспечивают при заданной шероховатости наименьшее гидромеханическое сопротивление движению текучей среды. Например, Ванони /Vanoni, 1953/ на основании опытов с потоком в лотке отмечает, что работа, затрачиваемая потоком на поддержание наносов во взвешенном состоянии, используется для гашения турбулентных пульсаций и, следовательно, уменьшения гидромеханических сопротивлений. Такого же мнения придерживаются и другие исследователи /Shaver, Merrill, 1959; Savins, 1964; Metzner, Graham, 1964; Баренблатт,

Булина, Мясников, 1965/, отмечавшие снижение сопротивления обтекаемых турбулентным потоком тел при введении высокомолекулярных соединений на их поверхность. Различие в механике перечисленных спонтанно сформированных турбулентным потоком поверхностей состоит лишь в том, что в одном случае поток формирует русло или поверхность, а в другом - движущееся тело формирует обтекающий его поток. Однако эти явления идентичны для рассматриваемых тел и поверхностей, так как "все равно - движется ли твердое тело в жидкости или жидкость около твердого тела; в обоих случаях мера сопротивления при прочих равных условиях одна и та же" /Менделеев, 1946/.

Для обтекаемых турбулентным потоком тел по закону Ньютона касательное напряжение τ , приходящееся на единицу площади Ω поверхности тела, равно /Патрашев, 1953/:

$$\tau = \frac{P\Omega}{\Omega} = \frac{1}{2} \cdot C_x \cdot \rho \cdot V_{max}^2,$$

/5/

Р Ы Б Ы	длина тела до кон- ца поз- во- ноч- ного стол- ба $L, \text{см}$	поло- вина най- боль- шей ши- ри- ны те- ла, $B, \text{см}$	най- боль- шая пло- щадь попе- реч- ного сече- ния тела, $\omega, \text{см}^2$	Наи- боль- шая ско- рость пла- ва- ния, $V_{\text{max}},$ см/сек	расстоя- ние меж- ду скле- ритами на окон- чании откры- той части чешуи на по- лови- не най- боль- шей вы- соты тела, $d_6, \text{см}$	смон- ченный пери- метр най- боль- шего попе- реч- ного сече- ния тела, $X, \text{см}$	гидрав- личес- кий радиус най- боль- шего попе- речно- го се- чения тела, $\frac{\omega}{X} = R, \text{см}$
Меч-рыба <i>Xiphias gladius</i>	с мечом 149,0 без меча 104,0	9,85	304,5	3000	Склериты от- сутст- вуют	61,9 61,9	4,92 4,92
Тунец - <i>Thunnus thunnus</i>	192,0	21,60	624,0	2000	0,0024	143,0	11,35
Красная - <i>Oncorhynchus nerka</i>	48,0	2,70	42,4	500	0,0040	30,9	1,37
Лосось черно- морский -	96,5	8,00	402,0	842	0,0038	77,5	5,18
Семга - <i>Salmo salar</i>	45,5	1,70	22,6	320	0,0030	24,3	0,93
Кумжа - <i>Salmo trutta</i>	38,0	1,65	20,4	300	0,0036	23,4	0,87
Карась - <i>Carassius auratus</i>	13,0	1,30	8,6	169	0,0034	12,7	0,68
Шпрот - <i>Sprattus sprattus balticus</i>	8,5	0,45	1,2	75	0,0031	5,1	0,24
Судак - <i>Lucioperca lucio</i>	37,5	2,20	23,4	180	0,0036	20,9	1,12
Пикша - <i>Melanogrammus aeglefinus</i>	25,0	1,45	9,9	140	0,0027	13,5	0,73
Сельдь атлантичес- кая - <i>Clupea pareticus</i>	30,0	1,90	16,5	200	0,0023	17,2	0,96
Форель - <i>Salmo irideus</i>	12,0	0,90	3,8	70	0,026	8,6	0,44
Лещ - <i>Abramis brama</i>	23,5	1,50	16,6	96	0,0042	22,0	0,75
Карась - <i>Carassius auratus</i>	7,8	0,75	3,1	70	0,0066	8,2	0,38
Дельфин-белобочка <i>Delphinus delphis ponticus</i>	167,0	15,00	707,0	1250	0,0018*	94,2	7,50
Дельфин-азовка <i>Phocaena phocaena relicta</i>	111,0	12,70	507,0	1100	0,0018*	79,8	6,37

* Средняя крупность выделений эпидермиса.

Числа Рейнольдса при температуре воды 15°C		Число Фруда,	Коэффи- циент сопро- тивле- ния тре- ния при темпера- туре воды 15°C, C_x	Среднее касатель- ное нап- ряжение на поверх- ности те- ла при V_{max} $\frac{P_{\Omega}}{\Omega} = \tau$, $кг/см^2$	Лобовое сопро- тивле- ние, $P_{\omega}, кг$	Полное сопротив- ление, $P_{\Omega}, кг$
$Re = \frac{V_{max} \cdot L}{\nu}$	$Re = \frac{V_{max} \cdot \theta}{\nu}$	$Fr = \frac{V^2_{max}}{g \theta}$				
$3,92 \cdot 10^7$	$2,59 \cdot 10^6$	930	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-
$3,37 \cdot 10^7$	$3,79 \cdot 10^6$	188,8	$9,38 \cdot 10^{-4}$	$1,96 \cdot 10^{-3}$	3,185	44,50
$2,10 \cdot 10^6$	$1,18 \cdot 10^5$	94,2	$1,21 \cdot 10^{-3}$	$1,58 \cdot 10^{-4}$	$6,71 \cdot 10^{-3}$	$0,37 \cdot 10^{-2}$
$7,12 \cdot 10^6$	$5,91 \cdot 10^5$	90,4	$1,16 \cdot 10^{-3}$	$4,28 \cdot 10^{-4}$	$1,72 \cdot 10^{-1}$	2,40
$1,28 \cdot 10^6$	$4,76 \cdot 10^4$	61,2	$1,05 \cdot 10^{-3}$	$5,62 \cdot 10^{-5}$	$1,27 \cdot 10^{-3}$	$1,78 \cdot 10^{-2}$
$1,00 \cdot 10^6$	$4,38 \cdot 10^4$	55,6	$1,15 \cdot 10^{-3}$	$5,40 \cdot 10^{-5}$	$1,10 \cdot 10^{-3}$	$1,54 \cdot 10^{-2}$
$1,93 \cdot 10^5$	$1,22 \cdot 10^4$	22,4	$1,12 \cdot 10^{-3}$	$1,67 \cdot 10^{-5}$	$1,44 \cdot 10^{-4}$	$2,01 \cdot 10^{-3}$
$5,60 \cdot 10^4$	$2,96 \cdot 10^3$	12,7	$1,06 \cdot 10^{-3}$	$3,11 \cdot 10^{-6}$	$3,74 \cdot 10^{-6}$	$5,23 \cdot 10^{-5}$
$5,92 \cdot 10^5$	$3,47 \cdot 10^4$	15,0	$1,15 \cdot 10^{-3}$	$1,94 \cdot 10^{-5}$	$4,55 \cdot 10^{-4}$	$6,37 \cdot 10^{-3}$
$3,08 \cdot 10^5$	$1,78 \cdot 10^4$	13,8	$9,88 \cdot 10^{-4}$	$1,01 \cdot 10^{-5}$	$1,00 \cdot 10^{-4}$	$1,40 \cdot 10^{-3}$
$5,27 \cdot 10^5$	$33,33 \cdot 10^4$	21,4	$9,21 \cdot 10^{-4}$	$1,92 \cdot 10^{-5}$	$3,17 \cdot 10^{-4}$	$4,44 \cdot 10^{-3}$
$7,37 \cdot 10^4$	$5,52 \cdot 10^3$	5,6	$9,70 \cdot 10^{-4}$	$2,48 \cdot 10^{-6}$	$9,43 \cdot 10^{-6}$	$1,32 \cdot 10^{-4}$
$1,98 \cdot 10^5$	$1,26 \cdot 10^4$	6,3	$1,24 \cdot 10^{-3}$	$5,98 \cdot 10^{-5}$	$9,92 \cdot 10^{-5}$	$1,39 \cdot 10^{-3}$
$4,80 \cdot 10^4$	$4,60 \cdot 10^3$	6,7	$1,55 \cdot 10^{-3}$	$3,97 \cdot 10^{-6}$	$1,23 \cdot 10^{-5}$	$1,72 \cdot 10^{-4}$
$1,83 \cdot 10^7$	$1,64 \cdot 10^6$	106	$8,70 \cdot 10^{-4}$	$6,92 \cdot 10^{-4}$	$4,89 \cdot 10^{-1}$	6,85
$1,07 \cdot 10^7$	$1,22 \cdot 10^6$	97,1	$8,70 \cdot 10^{-4}$	$5,36 \cdot 10^{-4}$	$2,72 \cdot 10^{-1}$	3,81

где P_{Ω} - сила полного сопротивления трения движущегося в воде тела; ρ - плотность воды; C_x - коэффициент полного сопротивления трения, определяемый в процессе опыта; V_{max} - наибольшая скорость тела. Касательное напряжение τ при обтекании открытым турбулентным потоком побочней и гряд в руслах рек определяется формулой /Маккавеев, Коновалов, 1939/

$$\tau = \frac{1}{C_w^2} \cdot \gamma \cdot V_{cp}^2, \quad /6/$$

где C_w - коэффициент Шези, определяемый из опыта; V_{cp} - средняя скорость на вертикали; γ - удельный вес воды. Имея в виду, что спонтанно сформированным турбулентным потоком телам свойственно единство механизма турбулентных закономерностей и, следовательно, идентичный характер распределения скоростей вблизи их поверхностей, получим из равенства касательных напряжений в выражениях /5/ и /6/ следующее равенство:

$$\frac{1}{C_x} \cdot \rho \cdot V_{max}^2 = \frac{1}{C_w^2} \cdot \gamma \cdot V_{cp}^2, \quad /7/$$

для выражения V_{cp} (через V_{max}) воспользуемся теоретическим решением А.С. Образовского /1955/. Распределение скоростей V по глубине широких открытых потоков принято считать по уравнению параболы /Маккавеев, Коновалов, 1939/:

$$V = V_{max} \cdot \eta^k, \quad /8/$$

где η - относительная высота рассматриваемой точки на вертикали, считая от дна; V_{max} - скорость, близкая к наибольшей на поверхности потока; k - показатель степени, изменяющийся в зависимости от шероховатости дна в пределах 0,1-0,25.

При установившемся движении воды в широких руслах с аллювиальным дном, что соответствует рассматриваемым условиям, по многочисленным данным опытов $k=0,18$ /Маккавеев, Коновалов, 1939/. Исходя из этих представлений, А.С.Образовский находит

$$V_{max} = (1+k) \cdot V_{cp}. \quad /9/$$

Для определения коэффициента Шези C_w используем нашу формулу /Кудряшов, 1965/:

$$C_w = \sqrt[4]{\frac{a}{d_{д.н}}} \cdot \sqrt{g}, \quad /10/$$

где $d_{д.н}$ - средний диаметр частиц песка в аллювиальном русле; $a = 10^4 \cdot \mathcal{H}^4 \cdot \frac{\sqrt[3]{a}}{g^{1/3}}$ - показатель, характеризующий гидромеханические условия переноса частиц песка. В качестве меры шероховатости поверхности рыб принято расстояние между соседними склеритами d_8 /см.таблицу/, так как во время движения рыбы студенисто-эластичный эпидермис, покрывающий склериты, прогибается под действием турбулентных возмущений и склериты оказывают основное влияние на силу сопротивления трения. По нашим измерениям d_8 изменяется у обследованных рыб от 24 до 65,5 мк. Мы полагаем, что выделяемая из слизистых желез эпидермиса слизь отделяется от поверхности тела в поток в виде отдельных частиц этих же размеров. Отметим, что уменьшение сопротивления трения в опытах Ванони /Vanoni, 1953/ достигнуто при крупности частиц песка $d_{д.н} = 100$ мк.

Таким образом, заменяя в уравнении /7/ $V_{ср}$ через V_{max} по формуле /8/ и учитывая равенство $d_{д.н} = d_8$ и формулу /10/, получим выражение для определения коэффициента сопротивления трения рыб:

$$C_x = \frac{2 \cdot \sqrt[6]{g} \cdot \sqrt{d_8}}{(1+k)^2 \cdot 10^2 \mathcal{H}^2 \sqrt[3]{g}} \cdot \quad /11/$$

Вычисленные по формуле /11/ коэффициенты сопротивления трения C_x обследованных экземпляров рыб применительно к температуре воды 15°C представлены в таблице. Если основываться на теории В.В. Шулейкина /Шулейкин, 1953/, т.е. рассматривать коэффициент C_x как показатель мореходных качеств рыбы, то можно убедиться, что наилучшими мореходными качествами обладают экземпляры тунца и сельди, а наихудшими - мелкого карася и леща. Это подтверждается и ихтиологическими наблюдениями /Радков, Протасов, 1946; Барсуков, 1960; Честной, 1960; Алеев, 1963; Walters, Fierstine, 1964/.

Зависимость вычисленного коэффициента C_x от числа Рейнольдса /рис.2/ применительно к рыбам подчиняется теоретически установленному Блазиусом для гладких плоских пластин общему выражению /1/ в виде

$$C_x = 0,0017 \cdot \left(\frac{V_{max} \cdot L}{\nu} \right)^{-0,035}, \quad /12/$$

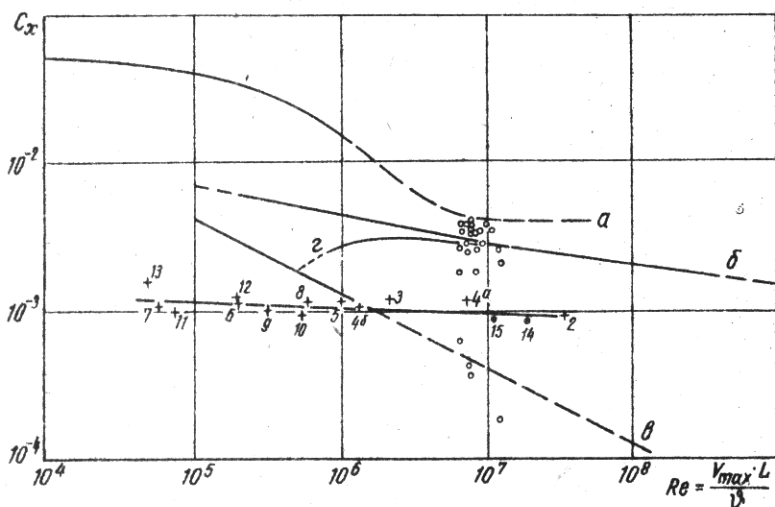


Рис. 2. Зависимость коэффициента сопротивления трения от числа Рейнольдса при обтекании водным потоком различных тел:

/о/ - по опытам Лэнга с тихоокеанским бело-боким дельфином $L = 205$ см; /•/ - по расчету Кудряшова для дельфина-белобочки $L = 167$ см и для дельфина-азовки $L = 111$ см; /+/ - по расчету Кудряшова для рыб /порядковый номер в таблице/; а - по Шудейкину для мертвых рыб и дельфина; б - турбулентное обтекание гладкой плоской пластины по Шлихтингу и Седову; в - ламинарное обтекание по Блазиусу; г - переходный режим.

где L - длина рыбы до конца позвоночного столба; при этом $4,8 \cdot 10^4 < Re < 3,37 \cdot 10^7$. На рис. 2 для сравнения нанесены обработанные нами данные по исследованиям Лэнга /Lang, 1960; Boggs, Tokita, 1963/ и Фоке /Focke, 1965/ с дельфинами и данные В.В.Шудейкина /Шудейкин, 1953, 1965/ для

мертвых рыб и дельфинов. Из сравнения значений C_x по материалам разных исследователей видно, что вычисляемые по формуле /11/ величины C_x являются наименьшими, при этом формулы /2/ и /12/ не обеспечивают скачкообразного направления кривой в том месте графика, где для обтекания гладкой плоской пластины с нулевым углом атаки наблюдается переход от ламинарного режима к турбулентному /Седов, 1954; Шлихтинг, 1965/. В этом свойстве кривой проявляется еще одна из особенностей спонтанно сформированных турбулентным потоком поверхностей и тел.

Измерениями корпусов обследованных экземпляров /см.таблицу/ установлено, что площадь наибольшего поперечного сечения примерно в 14 раз меньше всей поверхности тела, исключая плавники. Полученные данные позволяют определить по формуле /5/ как лобовое P_ω , так и полное сопротивление P_Ω обследованных экземпляров:

$$\left. \begin{aligned} P_\omega &= 2,5 \cdot 10^{-10} \cdot V_{max}^4 \\ P_\Omega &= 3,5 \cdot 10^{-9} \cdot V_{max}^4 \end{aligned} \right\} \quad /13/$$

Четвертая степень / V_{max} / объясняется изменением площадей Ω и ω у различных экземпляров рыб в квадратичной зависимости от $V_{max} \left(\frac{cm}{сек} \right)$. Зависимость P_Ω при V_{max} от числа $Re = \frac{V_{max} \cdot \theta}{\nu}$, вычисленного для температуры воды 15°C, представлена на рис. 3 и выражается формулой

$$P_\Omega = 6 \cdot 10^{-12} \cdot \left(\frac{V_{max} \cdot \theta}{\nu} \right)^2, \quad /14/$$

где θ - половина наибольшей ширины тела. В данном случае при наибольшей скорости V_{max} с увеличением силы полного сопротивления число Рейнольдса и гидравлический радиус R (см) наибольшего поперечного сечения тел возрастают. В качестве гидравлического радиуса R принято отношение площади наибольшего поперечного тела к смоченному периметру этого сечения. Наибольшим гидравлическим радиусом из различных форм поперечных сечений обладает окружность, т.е. пропускная способность для обтекающего потока при прочих равных условиях в этом случае наибольшая. Однако круглое поперечное сечение тела является некоторым препятствием для латеральной изгибаемости и, естественно, для маневренности.

Из анализа полученных данных видно, что полное сопротивление воды движению рыб при наибольших скоростях меняется от 52,3 мг у шпрота длиной 8,5 см до 44,5 кг у двухметрового тунца, что вполне реально с точки зрения их биологической мощности.

Рассмотрим обтекание рыб турбулентным потоком воды, пользуясь уравнениями гидромеханики /Патрашев, 1953/. Выделим плоский горизонтальный поток, проходящий через центр тяжести рыбы, при этом ось x направим по длине тела рыбы, ось y - по горизонтали, ось z - по вертикали. Уравнения Эйлера - Стокса для потока вязкой несжимаемой тяжелой жидкости представляет собой локальную и конвективную силы инерции, силу тяжести, перепад давления и силу вязкости, т.е.

$$\frac{\partial V_i}{\partial t} + \sum V_j \cdot \frac{\partial V_i}{\partial x_j} = G_i - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \cdot \Delta^2 V_i, \quad /15/$$

где $i, j = \frac{1}{x}; \frac{2}{y}; \frac{3}{z}$.

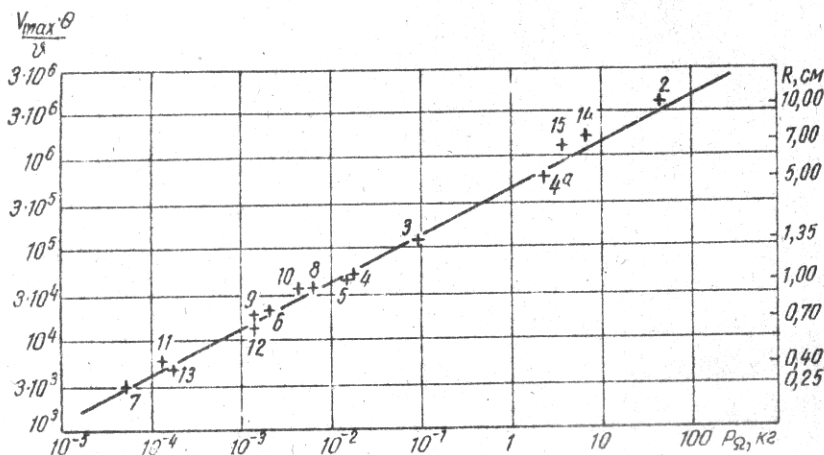


Рис. 3. Зависимость силы полного сопротивления трения рыб от числа Рейнольдса и гидравлического радиуса их наибольшего поперечного сечения при максимальной скорости перемещения.

Для условий плоского потока

$$V_x \cdot \frac{\delta V_x}{\delta x} \sim V_y \cdot \frac{\delta V_x}{\delta y} \sim V_z \cdot \frac{\delta V_x}{\delta z} \ll \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\delta p}{\delta x}, \quad /16/$$

$$\frac{\delta^2 V_x}{\delta x^2} \sim \frac{\delta^2 V_x}{\delta z^2} \ll \frac{\delta^2 V_x}{\delta y^2}. \quad /17/$$

Таким образом, из уравнения /15/ для стационарного течения получим

$$\frac{\delta^2 V_x}{\delta y^2} = - \frac{\Delta p \cdot g}{\gamma \cdot L}, \quad /18/$$

где Δp — перепад давления на длине рыбы.

Интегрируя по y , получим

$$\frac{\delta V_x}{\delta y} = - \frac{\Delta p \cdot g}{\gamma \cdot L} \cdot y + C_1, \quad /19/$$

$$V_x = - \frac{\Delta p \cdot g}{\gamma \cdot L} \cdot \frac{y^2}{2} + C_1 \cdot y + C_2. \quad /20/$$

Постоянные C_1 и C_2 определяются из условий:
при $y=0$ $V_x = C_2 = 0$;

при $y=\theta$
$$V_{max} = C_1 \cdot \theta - \frac{\Delta p \cdot g}{\gamma \cdot L} \cdot \frac{\theta^2}{2}. \quad /21/$$

Отсюда

$$C_1 = \frac{V_{max}}{\theta} + \frac{\Delta p \cdot g \cdot \theta}{\gamma \cdot L \cdot 2}. \quad /22/$$

Таким образом,

$$V_x = V_{max} \cdot \frac{y}{\theta} - \frac{\Delta p \cdot g \cdot \theta^2}{2 \gamma \cdot L} \cdot \frac{y}{\theta} \left(\frac{y}{\theta} - 1 \right). \quad /23/$$

Для выражения средней скорости обтекающего рыбу потока V_{cp} через V_{max} воспользуемся формулой /9/.
Обозначим $\frac{y}{\theta} = \bar{y}$, при этом $0 \leq \bar{y} \leq 1$.

Однако,

$$V_{cp} = \int_0^1 V_x \cdot d\bar{y}. \quad /24/$$

Отсюда

$$V_{cp} = V_{max} \cdot \frac{\bar{y}^2}{2} \Big|_0^1 - \frac{\Delta p \cdot g \cdot \theta^2}{2 \cdot \nu \cdot L} \cdot \frac{\bar{y}^3}{3} \Big|_0^1 - \frac{\bar{y}^2}{2} \Big|_0^1 = \frac{V_{max}}{2} + \frac{\Delta p \cdot g \cdot \theta^2}{12 \cdot \nu \cdot L} \quad /25/$$

или

$$\frac{V_{cp}}{V_{max}} = \frac{1}{(1+k)} - \frac{1}{2} = \frac{\Delta p \cdot g \cdot \theta^2}{12 \cdot \nu \cdot L \cdot V_{cp}(1+k)} = const... \quad /26/$$

Обозначим $\frac{\Delta p}{L} = J$; $\frac{V_{cp} \cdot \theta}{\nu} = Re$ - число Рейнольдса;
 $\frac{V_{cp}}{g \cdot \theta} = Fr$ - число Фрунда. Из выражения /26/ получим

$$const = \frac{J \cdot V_{max} \cdot \theta \cdot g \cdot \theta}{\nu \cdot V_{max}^2} = \frac{J \cdot Re}{Fr}. \quad /27/$$

При установившемся обтекании рыб турбулентным потоком расход воды q , приходящийся на единицу длины смоченного периметра в наибольшем поперечном сечении, равен

$$q = V_{cp} \cdot \theta \cdot 1. \quad /28/$$

При этом площадь поперечного сечения вытесняемого телом потока $\omega = \theta \cdot 1$. По аналогии с движением турбулентного потока в аллювиальном русле /Яблонский, 1961/ получим

$$q = C_w \cdot \omega \sqrt{R \cdot J} \quad /29/$$

или

$$V_{cp} \cdot \theta \cdot 1 = C_w \cdot \theta \cdot 1 \cdot \sqrt{R \cdot J}. \quad /30/$$

По формуле /7/

$$C_w = \frac{\gamma \cdot V_{max}^2 \cdot 2}{(1+k)^2 \cdot V_{max}^2 \cdot \rho \cdot C_x} = \frac{2g}{(1+k)^2 \cdot C_x} \quad /31/$$

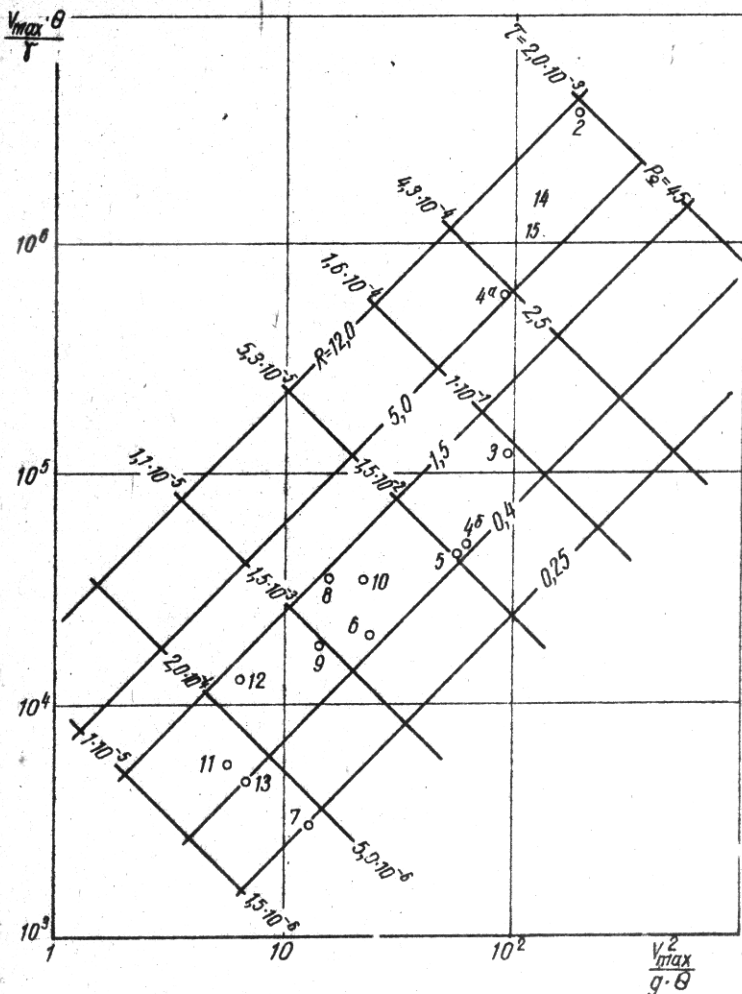


Рис.4. Связь чисел Фруда и Рейнольдса с касательным напряжением на поверхности рыб и гидравлическим радиусом наибольшего поперечного сечения тела при максимальной скорости движения.

или

$$C_w = \sqrt{\frac{2g}{C_x}} \cdot \frac{1}{(1+k)} \quad /32/$$

По формуле /30/ с учетом /32/ получим

$$\frac{V_{max}}{(1+k)} \cdot \theta \cdot l = \frac{1}{(1+k)} \cdot \sqrt{\frac{2g}{C_x}} \cdot \theta \cdot l \cdot \sqrt{R \cdot J} \quad /33/$$

или

$$V_{max}^2 = \frac{2g}{C_x} \cdot R \cdot J \quad /34/$$

Таким образом, из /27/ получим

$$const = \frac{\rho \cdot V_{max}^2 \cdot C_x}{2} \cdot \frac{V_{max} \cdot \theta}{\gamma} \cdot \frac{g \cdot \theta}{V_{max}^2} \cdot \frac{1}{\theta \cdot \gamma \cdot R} \quad /35/$$

В выражении /35/ первый множитель равен τ /см. формулу /5/, второй - число Рейнольдса, третий - число Фруда, четвертый - зависит от гидравлического радиуса R .

Отсюда

$$Re = \frac{Fr \cdot R \cdot \theta \cdot \gamma}{\tau} \cdot const. \quad /36/$$

Представленные на рис. 4 результаты проверки выражения /36/ на обследованных экземплярах рыб свидетельствует о том, что а/ рассмотренное на основании классической теории решение, несмотря на ряд допущений, подтверждается материалами наблюдений; б/ при движении рыб в турбулентном режиме обтекания определяющими критериями являются числа Рейнольдса, Фруда, касательное напряжение на их поверхности и гидравлический радиус в наибольшем поперечном сечении тела.

Л И Т Е Р А Т У Р А

А л е е в Ю.Г. Функциональные основы внешнего строения рыбы.

Изд-во АН СССР, М., 1963.

Б а р с у к о в В.В. Скорость движения рыб. - Природа, 3, 1960.

Б а р е н б л а т т Г.И., Б у л и н а И.Г., М я с н и к о в В.П.

Влияние растворов некоторых высокомолекулярных соединений на снижение сопротивления при обтекании тел турбулентным потоком.

Прикладная механика и техническая физика. Новосибирск, 3, 1965.

- Д е л ь - Н у н ц и о Б. Распределение вихрей в закрытых трубах при турбулентном и ламинарном режимах. - В кн.: Проблемы турбулентности. М.-Л., 1936.
- К а р м а н Т. Число Рейнольдса с точки зрения кинетической теории газов. - В кн.: Проблемы турбулентности. М.-Л., 1936.
- К у д р я ш о в А.Ф. Воспроизведение русла побочного типа в лабораторных условиях. - В кн.: Гос.гидрол. ин-та, 69. Гидрометеиздат, Л., 1959.
- К у д р я ш о в А.Ф. О балансовом способе учета наносов и оценка интенсивности заиления водохранилищ. - В кн.: Водный баланс и заиление малых водохранилищ ЦЧО. "Наука", Л., 1965.
- М а к к а в е е в В.М., К о н о в а л о в И.М. Гидравлика. Речиздат. М., 1939.
- М е н д е л е е в Д.И. Сочинения. Т.УП. Геофизика и гидродинамика. Изд-во АН СССР, 1946.
- О б р а з о в с к и й А.С. Применение степенной зависимости к построению модели структурного механизма открытого турбулентного потока. - В кн.: Тр.гидравл. лаборатории ин-та Водгео, сб.4. М., 1955.
- П а т р а ш е в А.Н. Гидромеханика. Военмориздат, М., 1953.
- Р а д а к о в Д.В., П р о т а с о в В.Р. Скорости движения и некоторые особенности зрения рыб. Справочник. "Наука". М., 1964.
- С е д о в Л.И. Методы подобия и размерности в механизме. Гос.техн.теор.изд-во. М., 1954.
- Ф е й д ж , Т о у н е н д. Исследования турбулентного течения при помощи микроскопа. - В кн.: Проблемы турбулентности. М.-Л., 1936.
- Ч е с т н о й В.Н. Максимальные скорости движения рыб. - Рыбное хозяйство, 1961.
- Ш л и х т и н г Г. Теория пограничного слоя. И.Л. М., 1956.
- Ш у л е й к и н В.В. Физика моря. Изд-во АН СССР. М., 1953.
- Ш у л е й к и н В.В. Энергетика движущейся рыбы. - ДАН СССР, отд.техн.наук, 165, 3, 1965.
- Я б л о н с к и й В.С. Краткий курс технической гидромеханики. Гос.изд.физ.мат.лит-ры. М., 1961.

- B l a s i u s H. Grenzschichten in Flüssigkeiten mit kleiner Reibung.- Z. Math. Phys., 56, 1908.
- B o g g s , T o k i t a . Third Symposium. Naval Hydrodynamics. Highperformance Ships, 1963.
- B o g g s , T o k i t a . Naval Engineers journal, 75,2,1963.
- F o c k e H. Über die Ursachen der hohen Schwimmgeschwindigkeiten der Delphine.- Zschr. für Luftwissenschaften, 13, 2, 1965.
- L a n g I.G. Naval hydrodynamics, IX, 1960.
- L i n , M o u l t o n , P u t n a m . Ind. Eng. Chem., 45, 1953.
- M a g n a n A., S a i n t e L a q u e A. Essai de théorie du poisson. Services techniques de l'aéronautique.- Bull. Technique, 58, 1929.
- M e t z n e r A.B., G r a h a m P.M. Turbulent flow characteristics of viscolastic fluids.- J. Fluid. Mech., 20, 2, 1964.
- R o s e n M.W. Bull. an American Soc. Mech. Eng-s, N 61-WA-203, 1961.
- S a v i n s J.G. Drag reduction characteristics of solutions of macromolecules in turbulent pipe flow.- J. Soc. Petr. Engng., 4, 3, 1964.
- S h a v e r R.G., M e r r i l E.M. Turbulent flow of Pseudoplastic Polymer Solutions in straight Cylindrical Tubes.- J. Amer. Inst. Chem. Engng., 5, 2, 1959.
- V a n o n i V. Some Effects of Suspended Sediment on Flow Characteristics. Proc. 5 th Hydr. Conf. State Univ. of Iowa, Studies in Engineering.- Bull. 34, 1953.
- W a l t e r s V. Body form and swimming performance in the Scombroid fishes.- American Zoologist, 2, 1962.
- W a l t e r s V., F i e r s t i n e H. Measurements of swimming speed of yellowfin tuna and wahoo.- Nature, 202, 4928, 1964.