

ЭКОЛОГИЯ МОРЯ



26

1987

В. И. БЕЛОИВАНЕНКО, С. М. ИГНАТЬЕВ

ФОТОГРАФИЧЕСКАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ ГИДРОБИОНТОВ И ЕЕ ПРИМЕНЕНИЕ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ОСОБЕННОСТЕЙ ПЛАВАНИЯ КРЕВЕТОК

Изучение локомоторных механизмов живых объектов представляет не только теоретический, но и практический интерес. Особое внимание уделяется выяснению характера и способов локомоции, принципов работы движителей, регистрации траектории движения, определению мгновенных значений скоростей и ускорений. Для изучения динамики быстротекущих локомоторных актов целесообразно применение метода многофазовой фотографии (стробфотографии). С этой целью нами разработана специальная фотографическая установка. В основе ее работы заложен стробоскопический метод фоторегистрации движущихся объектов, которые освещаются импульсами света заданной частоты, заключающийся в фотографировании быстрой смены отдельных фаз движения изучаемого объекта и получении серии сдвинутых по времени изображений объекта на одном негативе. Применительно к быстродвижущимся организмам это позволяет получать не только статические, но и динамические характеристики, изучать работу органов локомоции, а также значительно облегчает анализ полученных материалов.

Разработанная установка позволяет проводить фоторегистрацию движения объекта в двух режимах: в режиме программируемого стробирования и в непрерывном режиме. В первом случае количество фаз регистрации задается заранее и устанавливается в пределах от 1 до 9. В непрерывном режиме количество фаз определяется только длительностью фотографической выдержки и частотой следования световых вспышек.

Блок-схема установки представлена на рис. 1. Установка содержит камеру для содержания животных (1), фотоаппарат (2), импульсный источник света (3), устройство управления (4), генератор электрических импульсов (5). Камера для содержания исследуемых организмов (1) представляет собой узкий аквариум прямоугольной формы, оборудованный съемным экраном с масштабной сеткой. Экран служит фоном для объектов съемки и окрашивается в черный цвет. Конструкция камеры позволяет устанавливать экран в одно из нескольких положений, благодаря чему изменяется толщина регистрируемого слоя воды в камере и обеспечивается фотосъемка подопытных гидробионтов в пределах глубины резкости объектива фотоаппарата (2). Использовался фотоаппарат марки «Зенит-ЗМ» с объективом «Гелиос-44». В верхней части камеры устанавливается импульсный источник света (3), в нижней — зеркальный отражатель. В качестве источника света применена газоразрядная стробоскопическая лампа ИСК-25, возможно применение фотоосветительной лампы ИФК-120, но гарантируемое время работы при этом снизится. Генератор импульсов (5) должен вырабатывать прямоугольные электрические импульсы положительной полярности амплитудой 2,5—5 В, длительностью не менее 3—5 мс и частотой следования 10—150 Гц. Таким требованиям удовлетворяет используемый в нашей схеме генератор марки Ф-590.

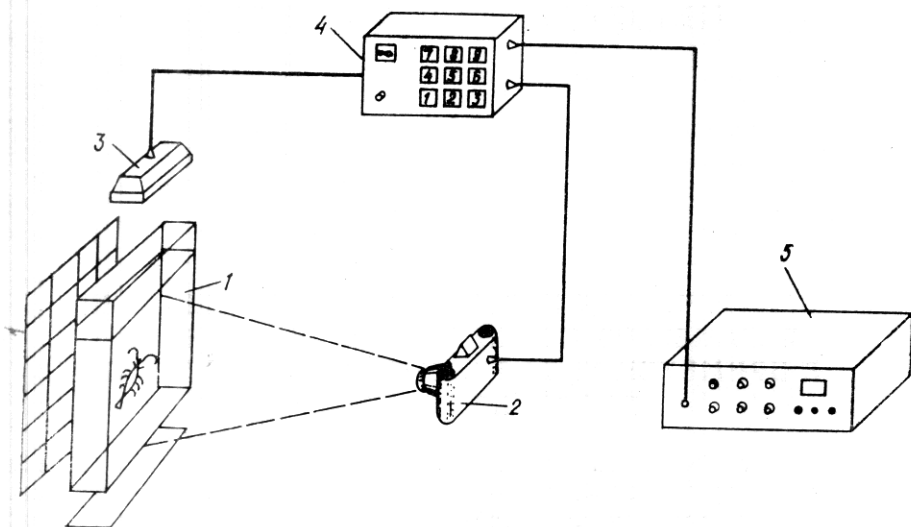


Рис. 1. Блок-схема фотографической установки для изучения движения гидробионтов. Объяснение в тексте

Принципиальная электрическая схема устройства управления импульсной лампой (4) приведена на рис. 2. Интегральная яркость вспышек определяется величиной емкости накопительных конденсаторов C_1 и C_2 . Для указанных на схеме номиналов энергия каждого импульса составляла 5 Дж. Поджиг лампы осуществляется при помощи импульсного трансформатора T_2 , теристора VD и контактов $K1.1$, германиевого реле $K1$. Реле $K1$ является нагрузкой электронного ключа (транзистор $VT1$), стробируемого сигналами генератора импульсов. При нажатии кнопки затвора фотоаппарата замыкается его синхроконттакт и через контакты реле $K2$ электрические импульсы от генератора поступают на вход электронного ключа (транзистор $VT1$ и реле $K1$), управляющего поджигом газоразрядной лампы. Большое быстродействие выбранного типа реле $K1$ (время срабатывания для РЭС-55Б не превышает 1 мс) позволяет надежно производить коммутацию цепей поджига импульсной лампы с частотой вспышек 150 Гц и более. Под действием разрядного тока, протекающего через лампу во время вспышки во вторичной обмотке трансформатора T_1 , индуцируется электрический импульс. Сформированные формирователем, который собран на микросхеме $D1$, импульсы счета, соответствующие количеству световых вспышек, поступают на декадный счетчик (микросхема $D2$), где суммируются и преобразуются в двоичный код. Дешифратор (микросхема $D3$) обеспечивает преобразование результата в десятичный код. При отработке заданного переключателем числа световых вспышек на управляющем входе электронного ключа, собранного на транзисторах $VT1$ и $VT2$, появляется электрический сигнал реле $K2$, который срабатывая своими контактами $K2.1$, прерывает подачу импульсов в схему от генератора. При установке подвижного контакта переключателя $S2$ в положение ∞ (нижнее по схеме) обеспечивается непрерывный стробоскопический эффект работы. В этом случае количество световых вспышек (N) при частоте их следования (F) и установленной выдержке (T) можно рассчитать по формуле

$$N = F/T.$$

Таким образом, управление описанным выше устройством сводится к выбору количества световых вспышек переключателем S_2 , частоты их следования, которая задается генератором импульсов, и нажатием спусковой кнопки затвора в нужный момент времени.

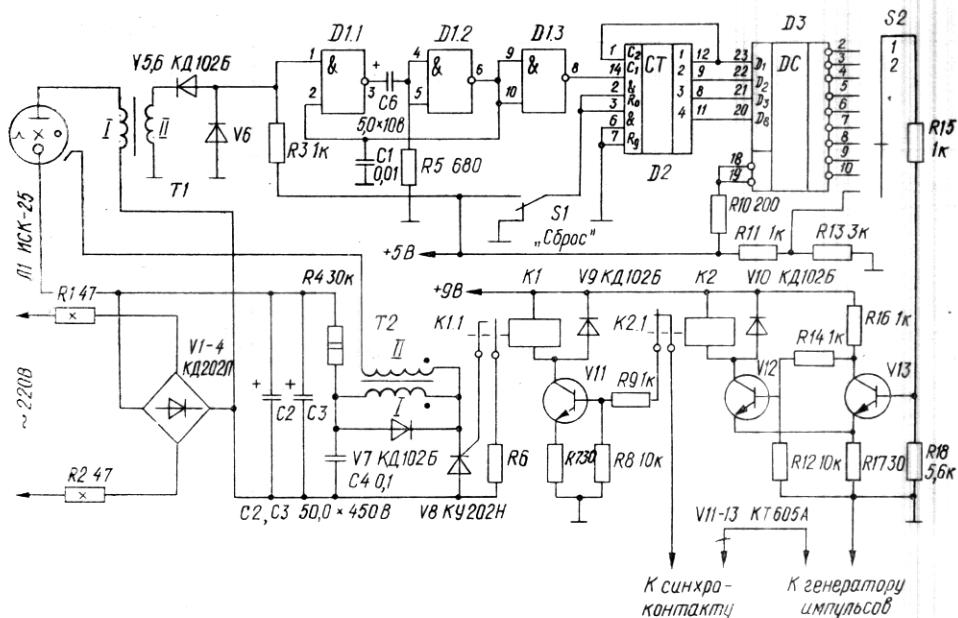


Рис. 2. Электрическая схема управления поджигом импульсной лампы и логической обработки счетных импульсов. Объяснение в тексте

Благодаря тому что импульсный источник света имеет очень малую длительность вспышки (порядка 0,1 мс), получаемые стробоскопические изображения отличаются четким изображением, а высокая интегральная яркость вспышки обеспечивает получение качественных снимков в черно-белом и цветном вариантах на фотоматериале с низкой светочувствительностью (до 32 ед. ГОСТа).

Описанная выше установка была использована для изучения особенностей локомоции нектобентосных креветок: *Palaemon adspersus* Ratke (Palaemonidae), *Pandalus latirostris* (Pandalidae), *Macrobrachium nipponense* (Palaemonidae).

Хорошие результаты получены при исследовании плавания этих гидробионтов с помощью хвостового веера. Это наиболее скоростной способ плавания ракообразных (скорости до 250 см/с) и используется практически только как локомоция бегства «Escape-swimming» (рис. 3) [2, 3]. Резкое сгибание abdomena с максимальным расправлением хвостового веера обеспечивает животному высокую скорость движения, ускорение при этом велико: увеличение скорости от 0 до 100—200 см/с происходит за 50—100 мс. Продолжительность гребного удара у разных видов колеблется от 20 до 200 мс [3, 12] (таблица). Использование многофазовой фотографии позволяет изучить изменение скорости плавания во время локомоторного цикла при этом способе движения у креветок. Продолжительность гребного удара у *Palaemon adspersus* составляет 100 ± 20 мс, причем 60 мс приходится на гребок хвостовым веером без участия abdomena. Скорость при этом возрастает до 150 см/с (фаза скачка), после чего она начинает уменьшаться (фаза инерционного плавания) (рис. 4). Полученные данные хорошо согласуются с имеющимися в литературе для других ракообразных [5, 7].

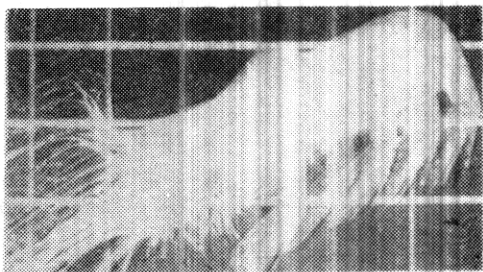


Рис. 3. Плавание креветки *Palaemon adspersus* при помощи хвостового веера; фаза инерционного плавания, уменьшение скорости от 50 до 34,6 см/с, ускорение $192,5 \text{ см/с}^2$, частота вспышек 50 гц

Вид	L_c , см	V , см/с		
		$V_{нач}$	$V_{кон}$	$V_{ср}$
Macrobrachium nipponense	5,0	50,0	45,0	47,5
		45,0	40,0	42,5
		40,0	35,0	37,5
		35,0	30,0	32,5
		30,0	25,0	27,5
Palaemon adspersus	3,0	0	27,2	13,6
		27,2	32,0	29,6
		32,0	38,5	35,2
		38,5	60,0	49,2
		60,0	140,0	100,0
		140,0	150,0	145,0
		50,0	46,2	48,0
Pandalus latirostris	6,0	46,2	42,3	44,3
		42,3	38,5	40,4
		38,5	34,6	36,5
		120,0	108,0	114,0
		108,0	96,0	102,0
		96,0	84,0	90,0
		84,0	72,0	78,0

Примечание. L_c — эффективная длина тела, измеряемая по направлению движения
 Re — число Рейнольдса; dV/dt — ускорение (см/с²).

Всякое тело, которое движется в воде, встречает гидродинамическое сопротивление, величину которого в гидромеханике принято выражать в виде безразмерных коэффициентов C_{xs} и C_{xd} [8]. И если гидродинамика плавания представителей нектона изучена достаточно полно [1, 4, 6], то для ракообразных эта область практически не исследована, несмотря на появление в последнее время ряда работ по гидродинамике плавания копепоид [5, 7, 13]. Существующие методы определения величины гидродинамического сопротивления ракообразных следующие:

1. Непосредственное определение силы гидродинамического сопротивления путем буксировки ракообразных (раки, langoustes) в гидроканале или их обдувки в аэродинамической трубе [10, 11].

2. Опыты со свободным падением наркотизированных животных или их увеличенных моделей [7—9].

3. Определение величины коэффициентов гидродинамического сопротивления живых объектов на участках инерционного плавания [5, 13]. Последний подход позволяет получить информацию о сопротивлении тел гидробионтов в их естественном состоянии. Особенности плавания креветок при помощи хвостового веера (наличие значительного участка инерционного плавания с отрицательным ускорением тор-

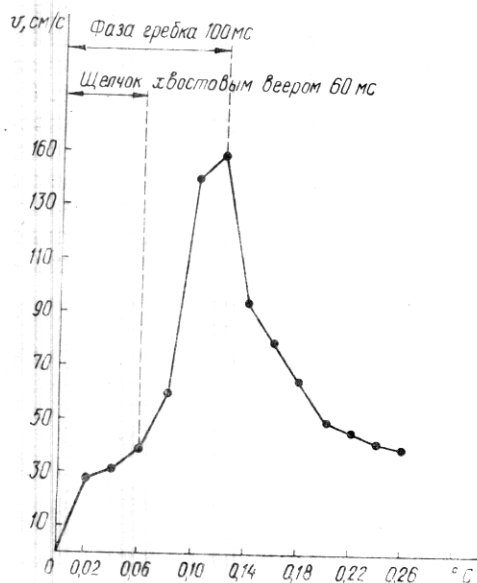


Рис. 4. Изменение скорости движения креветки *Palaemon adspersus* при плавании с помощью хвостового веера (по данным многофазовой фотографии)

V/L_c			C_{xs}	C_{xd}	Re	dV/df , см/с²
$V/L_{cнач}$	$V/L_{cкон}$	$V/L_{cср}$				
10,0	9,0	9,5	0,014	1,385	$2,2 \cdot 10^4$	—125
9,0	8,0	8,5	0,018	1,730	$2,1 \cdot 10^4$	—125
8,0	7,0	7,5	0,023	2,222	$1,9 \cdot 10^4$	—125
7,0	6,0	6,5	0,030	2,950	$1,6 \cdot 10^4$	—125
6,0	5,0	5,5	0,042	4,132	$1,4 \cdot 10^4$	—125
—	9,1	4,5	—	—	$4,0 \cdot 10^3$	+1360
9,0	10,7	9,7	—	—	$8,9 \cdot 10^3$	+240
10,7	12,8	11,7	—	—	$1,1 \cdot 10^4$	+240
12,8	20,0	16,4	—	—	$1,5 \cdot 10^4$	+1075
20,0	46,7	33,3	—	—	$3,0 \cdot 10^4$	+4000
46,7	50,0	48,3	—	—	$4,3 \cdot 10^4$	+500
16,7	15,4	16,0	0,010	0,768	$1,4 \cdot 10^4$	—192,5
15,4	14,1	14,7	0,012	0,905	$1,3 \cdot 10^4$	—192,5
14,0	12,8	13,4	0,014	1,090	$1,2 \cdot 10^4$	—192,5
12,8	11,5	12,2	0,017	1,576	$1,1 \cdot 10^4$	—192,5
20,0	18,0	19,0	0,011	0,323	$6,8 \cdot 10^4$	—600
18,0	16,0	17,0	0,013	0,403	$6,1 \cdot 10^4$	—600
16,0	14,0	15,0	0,017	0,518	$5,4 \cdot 10^4$	—600
14,0	12,0	13,0	0,023	0,690	$4,7 \cdot 10^4$	—600

[2—4]; V — абсолютная скорость плавания (см/с); V/L_c — относительная скорость плавания;

можения, которое определяется по данным многофазовой фотографии) допускают определение коэффициентов гидродинамического сопротивления по принятой для нектеров методике [1]. Зависимость величин коэффициентов гидродинамического сопротивления от величины чисел Рейнольдса соответствует известной из гидромеханики закономерности. Нектобентосные креветки, таким образом, занимают по величинам гидродинамического сопротивления промежуточное место между нектовыми [1, 6] и планктонными [5, 7, 13] организмами. Небольшие размеры тела, большое количество выступающих частей (особенно в области головогруды) создают предпосылки для относительно худшей (по сравнению с одноразмерными рыбами) обтекаемости креветок, которые испытывают значительное гидродинамическое сопротивление при плавании с помощью хвостового веера. Именно этими обстоятельствами объясняется тот факт, что способ локомоции не является способом длительного плавания.

1. Алев Ю. Г. Нектон. — Киев: Наук. думка, 1976. — 392 с.
2. Игнатьев С. М. О скоростях движения нектобентосных креветок (Decapoda, Natantia) // Экология моря. — 1983. — Вып. 15. — С. 58—61.
3. Игнатьев С. М. Функциональная морфология локомоции Eucarida (Crustacea, Euphausiacea, Decapoda): Автореф. дис. ... канд. биол. наук. — Севастополь, 1984. — 26 с.
4. Кокшайский Н. В. Очерк биологической аэро- и гидродинамики (полет и плавание животных). — М.: Наука, 1974. — 255 с.
5. Минкина Н. И., Павлова Е. В. Величина гидродинамического сопротивления и мощности при разных режимах плавания у *Calanus helgolandicus* (Claus) // Экология моря. — 1981. — Вып. 7. — С. 63—75.
6. Першин С. В. Плавание и полет в природе. — М., 1979. — 155 с. — (Итоги науки и техники / ВИНТИ. Сер. Бионика. Биокрибернетика. Биотехнология; Т. 4). — Библиогр.: с. 137—153 (465 назв.).
7. Степанов В. Н., Светличный Л. С. Исследование гидромеханических характеристик планктонных копепоид. — Киев: Наук. думка, 1981. — 126 с.
8. Шлихтинг Т. Теория пограничного слоя. — М.: Наука, 1974. — 711 с.
9. Шулейкин В. В. Физика моря. — М.: Наука, 1968. — 1083 с.
10. Bill G., Herrkind W. F. Drag reduction by formation movement in spiny lobsters // Science. — 1976. — 193, N 4258. — P. 1146—1148.
11. Pond C. M. The role of the waking legs in aquatic and terrestrial locomotion of

- the crayfish *Austropotamobius pallipes* (Lereboullet) // J. Exp. Biol. — 1975. — 62, N 2. — P. 447—454.
12. Webb P. W. Mechanics of escape-swimming responses in crayfish (*Orconectes virilis*). // Ibid. — 1979. — 79, N 2. — P. 245—263.

Ин-т биологии юж. морей
им. А. О. Ковалевского АН УССР,
Севастополь

Получено
11.07.85

V. I. BELOIVANENKO, S. M. IGNATIEV

**A CAMERA TO DETERMINE PARAMETERS OF HYDROBIONT MOBILITY
AND ITS APPLICATION TO STUDY PECULIARITIES
OF SHRIMP SWIMMING**

S u m m a r y

An original camera for studying parameters of hydrobiont mobility is created basing on the stroboscopic effect. It has helped studying characteristics of shrimp swimming with participation of a tail fan (the swimming rate up to 150 cm/s). The values of hydrodynamic resistance coefficients with this method of locomotion are determined. It is established that these hydrobionts occupy an intermediate position between planktonic and nectonic organisms by the values of the hydrodynamic resistance coefficients.