

УДК 599. 537

## СТРОЕНИЕ И ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ КОЖИ МЕЧ-РЫБЫ

В. В. БАБЕНКО\*, А. П. КОВАЛЬ\*\*

\*Институт гидромеханики НАН Украины, Киев

\*\*Институт зоологии НАН Украины, Киев

Получено 10.01.2004

Исследованы особенности некоторых систем и морфология кожных покровов меч-рыбы. Выполнен сравнительный анализ строения кожи быстроплавающих гидробионтов, включая меч-рыбу. На основании гидробионического моделирования экспериментальным путем проверены некоторые из обнаруженных особенностей тела и кожи меч-рыбы. Расчетным путем проанализировано гидродинамическое значение микроскладок на поверхности кожи меч-рыбы и толщины кожи, а также площади хвостового движителя меч-рыбы в сравнении с другими видами гидробионтов. На основании гидродинамического анализа некоторых особенностей строения тела меч-рыбы разработаны и экспериментально исследованы метод взаимодействия различных возмущений в пограничном слое и комбинированный метод снижения сопротивления.

Досліджено особливості деяких систем організму та морфології шкіряних покривів меч-риби. Виконано порівняльний аналіз будови шкіри швидко плаваючих гідробіонтів, в тому числі меч-риби. На основі гідробіонічного моделювання експериментальним шляхом перевірено деякі із виявлених особливостей. Розрахунковим шляхом проаналізовано гідродинамічне значення микроскладок на поверхні шкіри меч-риби та товщини шкіри, а також площини хвостового двигуна меч-риби в порівнянні з іншими видами гідробіонтів. На основі гідробіонічного аналізу деяких особливостей будови тіла меч-риби розроблено та експериментально досліджено метод взаємодії різних збуджень у граничному шарі та комбінований метод зниження опору.

The features of some systems and morphology of skin covers a sword-fish are investigated. The comparative analysis of a structure of a skin quickly swimming of hydrobionts, including a sword-fish is executed. On the basis hydrobionic modeling the experimental way checks up some of the found out features of a body and skin a sword-fish. The settlement way analyses hydrodynamic meaning micro wrinkle on a surface of a skin a sword-fish and thickness of a skin, and also area tail mover a sword-fish in comparison with other kinds of hydrobionts. On the basis of the hydrodynamic analysis of some features of a structure of a body the sword-fishes are developed and experimentally are investigated a method of interaction various disturbances in a boundary layer and combined method of decrease of drag reduction.

### ВВЕДЕНИЕ

Начиная с 1968 г., в Институте гидромеханики НАН Украины, в Институте зоологии НАН Украины и во многих других организациях выполнялась научная программа по фундаментальному исследованию различных проблем гидробионики. За это время проведены многочисленные теоретические и экспериментальные исследования морфологических и гидробионических особенностей гидробионтов, написан ряд монографий [1, 2 и др.] и зарегистрировано несколько научных открытий. В частности, получено открытие N 265 [3] об уникальных свойствах наружных покровов дельфинов снижать сопротивление. В [4, 5] разработаны гидробионические принципы снижения сопротивления, рассмотрена гидродинамика дельфинов, кратко изложена методика проведения гидробионических исследований и некоторые примеры моделирования систем организма. В [1, 2, 6–8] систематизированы также результаты исследования особенностей строения тела и наружных покровов рыб в зависимости от скорости их плавания. В [8] рыбы разделены на 4 группы в зависимости от

диапазона характерных скоростей плавания. Проведено сравнение различных аспектов строения их кожных покровов. Показано, что к третьей группе относятся некоторые виды акул и тунцы (2 семейства), к четвертой группе – ксифоидные: парусниковые и меч-рыбы (2 семейства).

Гидродинамические характеристики большинства видов гидробионтов исследованы достаточно подробно. У нас в стране и за рубежом изготовлены модели гидробионтов и некоторых систем их организмов. Например, в 70-х годах XX столетия в Ленинграде профессор С. И. Кроленко впервые изготовил самодвижущуюся модель дельфина, а в Институте гидромеханики НАН Украины под руководством профессора Л. Ф. Козлова выполнено моделирование наружных покровов и машущих движителей гидробионтов [9, 10 и др.]. В [11] приведены результаты исследования движения моделей тюленя, акулы и тунцов, изготовленных в различных организациях США.

Проблемы гидробионических исследований рассмотрены на международных конференциях, проходивших в США (1995 г., 1998 г., 1999 г., 2000 г.), Германии (1997 г.), в Украине в Киеве (1998 г.), в

Гонолуле (2000 г., 2001 г.), в Италии (2002 г.) и др.

Способность водных животных двигаться с большими скоростями находится в прямой зависимости от формы их тела, количества локомоторной мускулатуры, особенностей строения систем организма и движителя и от эффективности взаимодействия этих систем. При этом приспособления к быстрому плаванию в различных системах организма в процессе эволюции привели к появлению ряда адаптивных особенностей, направленных на снижение гидродинамического сопротивления и расхода энергии. В соответствии с принципами гидробионики [4, 5] особенности строения наружных покровов гидробионтов выработались под действием гидродинамического и физического полей окружающей среды, в частности, под воздействием структуры пограничного слоя, характерной для каждого диапазона скоростей, с которыми движутся соответствующие группы гидробионтов. Одновременно и взаимосвязанно в процессе эволюции вырабатывающиеся специфические структуры наружных покровов видоизменяли структуру пограничного слоя и формировали такой пограничный слой, который максимально уменьшал гидродинамическое сопротивление и, тем самым, болевое воздействие среды на рецепторный аппарат кожи.

Из [1, 2, 6-8] следует, что с наибольшими скоростями в воде движутся представители четвертой скоростной группы рыб – парусниковые и меч-рыбы. Скорости их движения достигают 35 м/с, а числа Рейнольдса –  $1 \cdot 10^8$ , поэтому эта группа рыб вызывает особый интерес. Впервые на гидродинамические функции жаберного аппарата ксифоидных обратили внимание в работах [12, 13]. Сделано также предположение, что специфическое строение слизеобразующего аппарата жабер улучшает обтекание тела [14, 15]. Выполнены исследования формы тела меч-рыбы [1, 2, 6, 16-19 и др.]. В работах [20, 21] рассмотрены особенности формы хвостовых плавников, а в [22] – особенности терморегуляции тела. В [1, 2, 6, 20] сделана попытка систематизировать некоторые гидродинамические особенности формы тела ксифоидных. В [12, 23] дано описание формы и особенности расположения чешуи на поверхности тела молодежи меч-рыбы. Краткое описание строения кожи и наличия в ней каналов и выводящих пор представлено в работе [24], на которую ссылаются другие авторы [25]. Подробное изучение кожного покрова различных участков тела позволило выявить и описать ряд новообразований в коже меч-рыбы [13, 14, 26, 27]. Однако эти особенности рассматрива-

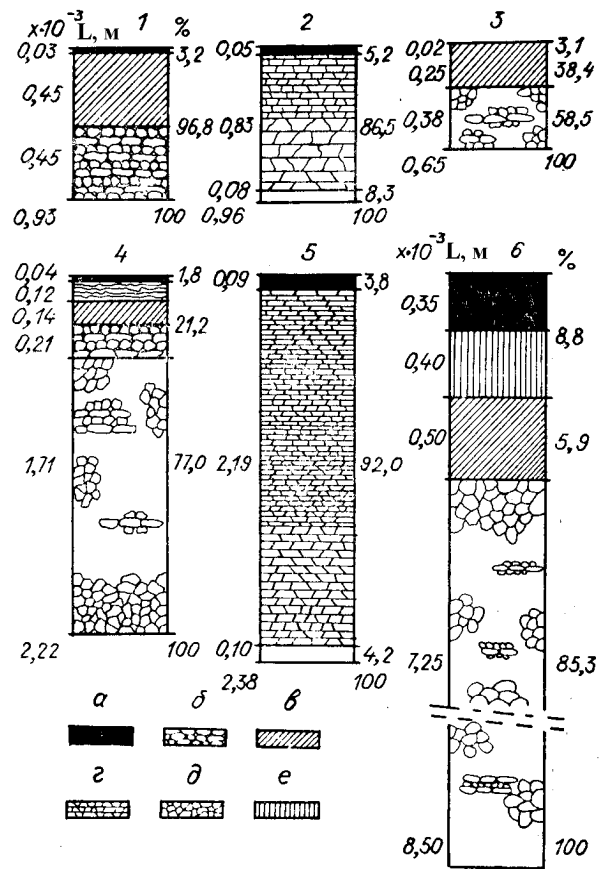


Рис. 1. Послойная структура гистологических срезов кожи скоростных гидробионтов [7]:

1 – желтоперый тунец; 2 – акула Мако; 3 – меч-рыба; 4 – пятнистый тунец; 5 – голубая акула; 6 – обыкновенный дельфин.

Слои кожи: а – эпидермис; б – волокнистый пигментный слой; в – соединительнотканый слой; г – слой коллагеновых пучков и волокон; д – слой подкожной жировой клетчатки; е – расчлененный сосочковый слой кожи дельфина

лись в отрыве друг от друга, без учета основных принципов гидробионики [4, 5]. Это не позволило достаточно полно обобщить их отличительные признаки и гидродинамические функции. В табл. 1 приведен перечень работ, в которых исследованы морфологические, гидробионические и гидродинамические особенности меч-рыбы.

В настоящей работе приведены обобщенные результаты исследования строения специфических структур кожного покрова и их взаимосвязь с особенностями строения тела меч-рыбы. Анализируются некоторые особенности строения кожи применительно к их способности снижения гидродинамического сопротивления.

Материал и методы морфологических исследований изложены в [13, 14, 26, 27].

Табл 1. Различные виды исследования меч-рыбы

Морфология				
№	Автор	Название журнала	Год	Задача
1	2	3	4	5
1	Овчинников В. В.	Биофизика, 11, N 1	1966	строение тела
2	Коваль А. П.	Бионика, 11	1977	строение кожи
3	Коваль А. П.	Бионика, 12	1978	строение кожи и жаберных крышек
4	Коваль А. П.	Бионика, 14	1980	строение кожи
5	Коваль А. П.	Бионика, 16	1982	строение кожи
6	Коваль А. П., Бутузов С. В.	Бионика, 24	1990	строение хвостового плавника
7	Коваль А. П., Кошовский А. А.	Бионика, 25	1992	строение теплообменников
Гидробионика				
1	2	3	4	5
1	Першин С. В., Чернышов О. Б., Козлов Л. Ф.	Бионика, 10	1976	гидробионические параметры строения кожи
2	Протасов В. Р., Старосельская А. Г.	Гидробионические особенности рыб, атлас	1978	теоретический чертёж, строение тела
3	Першин С. В.	Бионика, 12	1978	гидробионические параметры строения тела и хвостового плавника
4	Бабенко В. В., Юрченко Н. Ф.	Биофизика, 25, N 2	1980	гидробионические параметры строения кожи
5	Бабенко В. В., Юрченко Н. Ф.	Гидродинамические вопросы бионики	1983	гидробионические параметры строения кожи
6	Бабенко В. В., Коваль А. С.	Бионика, 23	1989	гидробионические параметры строения кожи
7	Бабенко В. В.	Бионика, 25	1992	гидробионические параметры строения кожи и хвостового плавника
Проблема снижения сопротивления				
1	2	3	4	5
1	Козлов Л. Ф., Леоненко И. В.	Доклады АН УССР	1971	обтекание шара (эксперимент)
2	Козлов Л. Ф., Леоненко И. В.	Бионика, 7	1973	обтекание тела вращения с наконечником (теория и эксперимент)
3	Золотов С. С., Ходорковский Я. С.	Бионика, 7	1973	обтекание аналога тела меч-рыбы (теория и эксперимент)
4	Алеев Ю. Г., Леоненко И. В.	Бионика, 8	1974	обтекание аналога тела меч-рыбы (эксперимент)
5	Амфилохий В. Б., Золотов С. С., Ивлев Ю. П.	Бионика, 14	1980	обтекание тела (теория)
6	Бабенко В. В., Коваль А. С.	Бионика, 16	1982	обтекание тела с инъекцией (эксперимент)
7	Воропаев Г. А., Козлов Л. Ф., Леоненко И. В.	Бионика, 16	1982	обтекание тела (теория)
8	Бабенко В. В.	Бионика, 17	1983	обтекание тела с инъекцией
9	Коробов В. И.	Бионика, 26	1993	обтекание тела, эластичн. поверхность и подача полимеров (эксперимент)

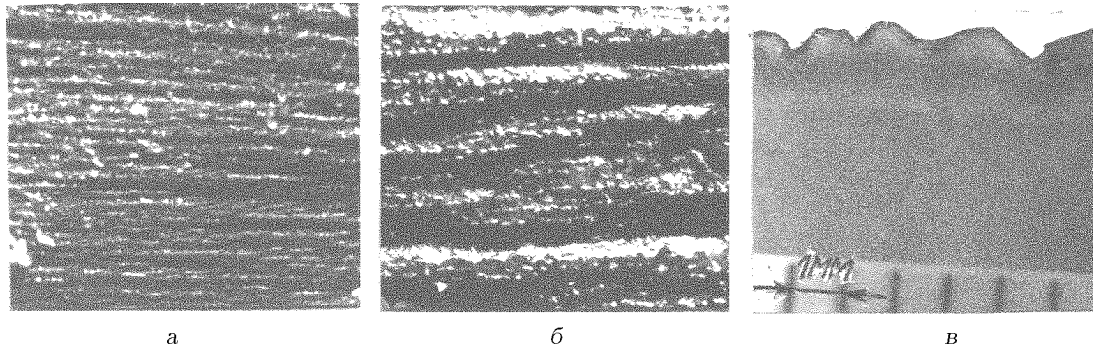


Рис. 2. Продольные складки на поверхности кожи меч-рыбы:  
 а - мелкая продольная шероховатость, увеличение 3-кратное; б - продольная складчатость, увеличение 6-кратное; в - поперечный разрез кожи в области продольной складчатости, увеличение 6-кратное

### 1. ОСОБЕННОСТИ СТРОЕНИЯ КОЖНЫХ ПОКРОВОВ МЕЧ-РЫБЫ

На рис. 1 приведено сравнение строения кожи некоторых видов быстроплавающих гидробионтов: тунцов, акул, дельфина и меч-рыбы. Общая толщина кожи в средней части тела, выраженная в долях длины  $L$ , составляет для дельфина около  $8.5 \cdot 10^{-3}L$ , а для рыб –  $(0.65 \div 0.95) \cdot 10^{-3}L$ , т. е. кожа у дельфина на порядок толще, чем у рыб. Слева на рис. 1 цифрами обозначена абсолютная величина толщины кожи, а справа – отношение к общей толщине кожи в процентах. Строение кожи у парусниковых и особенно у меч-рыбы более сложное, чем у других видов рыб [8]. В процессе эволюции в их коже появляются специфические образования, характерные только для этих видов.

#### 1.1. Продольные складки на поверхности кожи

У отловленных рыб на поверхности кожи видны продольные складки (рис. 2), которые образованы неравномерным развитием слоя плотной неоформленной соединительной ткани. Складки расположены по всей поверхности тела – от конца жаберных крышек до стебля хвостового плавника. Размер складок изменяется в продольном (кранио-каудальном) и поперечном (дорзо-вентральном) направлениях. На верхней (дорзальной) и нижней (вентральной) сторонах тела количество складок на 1 см поверхности достигает  $7 \div 9$  штук. На средней линии, в области миделя, складки значительно крупнее, их количество уменьшается до  $3 \div 4$  шт. на 1 см, а высота отдельно взятого гребня достигает 0.7 мм.

#### 1.2. Поры на поверхности кожи

На всей поверхности кожи имеются поры (рис. 3), из которых на живой рыбе при неболь-

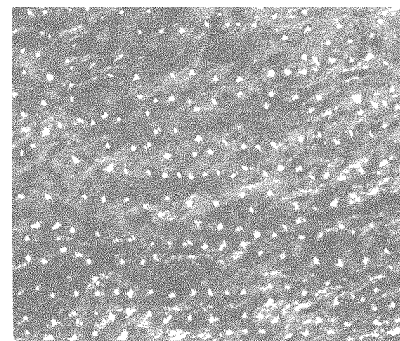


Рис. 3. Поры в коже меч-рыбы, увеличение 20-кратное (см. табл. 2)

шом надавливании на кожный покров выделяются капли слизистого вещества. Топография и размер пор представлены в табл. 2. Плотность пор и их размер на теле рыбы в различных участках тела практически одинаковы и только на узкой полоске на дорзальной линии за выступающим спинным плавником их количество примерно в два раза больше.

#### 1.3. Система подкожных каналов

Многочисленные поры соединены системой подкожных каналов (рис. 4), которые расположены в толще плотной соединительной ткани на глубине порядка 1 мм от поверхности тела. Средний диаметр каналов составляет 0.5 мм, а максимальный – до 1 мм. Более мелкие каналы ( $0.2 \div 0.3$  мм) расположены на голове и жаберных крышках. На боковой поверхности тела каналы имеют направление сверху-вниз – перпендикулярно продольной складчатости кожи. Между каналами довольно часто встречаются анастомозы, соединяющие все каналы в единую сообщающуюся систему. На спине, вентральной линии, голове и жаберных крышках каналы располагаются хаотично, не

Табл. 2. Количество и размер пор в различных участках тела на площади 10 мм<sup>2</sup> у меч-рыбы, L=260 см

	Участки тела (расположение от нижней челюсти в % длины рыбы)											
	30%		40%		55%		70%		80%		90%	
	К-во	φ, мм	К-во	φ, мм	К-во	φ, мм	К-во	φ, мм	К-во	φ, мм	К-во	φ, мм
Дорзальная линия	6	0.13	13	0.08	13	0.08	12	0.08	9	0.09	6	0.09
Средняя линия	6	0.10	7	0.10	7	0.10	6	0.10	6	0.09	5	0.09
Вентральная линия	6	0.10	6	0.09	6	0.08	6	0.08	5	0.07	5	0.08



Рис. 4. Система подкожных каналов на средней линии тела, увеличение 3-кратное

имея определенной направленности. Каналы левой и правой сторон тела не соединяются между собой ни по дорзальной, ни по вентральной линии, т. е. существуют две независимые друг от друга системы.

#### 1.4. Щели на поверхности тела

На спине у меч-рыбы имеется цепочка своеобразных щелей (рис. 5), в которых имеется несколько протоков, ведущих во внутренние полости, так называемые "ампулы", расположенные в

толще дермы (рис. 6). Цепочка щелей расположена от основания третьего луча на левой и правой стороне спинного плавника и оканчивается у дополнительного спинного плавника, расположенного на стебле. Длина щели в различных участках тела значительно колеблется. Наибольший размер щели зафиксирован за спинным плавником. Между крупными щелями встречаются и более мелкие. Наименьший размер щели у меч-рыбы длиной  $L = 1.57$  м – 2 мм, а максимальный – 10 мм. С увеличением длины тела увеличивается и максимальная длина щелей: при  $L = 2.6$  м длина щели достигает 18 мм.

За спинным плавником у меч-рыбы имеется небольшой продольный кожистый валик, являющийся остатком редуцированного большого спинного плавника, который у молоди меч-рыбы продолжается до второго спинного плавника, как у парусниковых [23]. Щели несколько смещены на боковые поверхности тела рыбы и располагаются поочередно по обеим сторонам выступающего первого спинного плавника и валика. У меч-рыбы длиной  $L = 1.57$  м на левой стороне обнаружено 18 щелей, а на правой – 22. Щели в толще дермы несколько сужаются и образуют пологое дно, где в зависимости от размера щели имеется от одного до четырех небольших округлых отверстий, протоков, с диаметром от 0.5 до 2 мм (рис. 5).

#### 1.5. Ампулы в коже меч-рыбы

Указанные протоки выходят из обширных полостей – ампул (рис. 6) круглой, овальной или бобовидной формы с небольшим утолщением в краниальном и каудальном участках. Как правило, из одной ампулы выходят протоки в две щели, при этом одна из них крупная, а другая – небольших размеров и располагаются они на противоположных сторонах разграничивающего валика. Ампу-

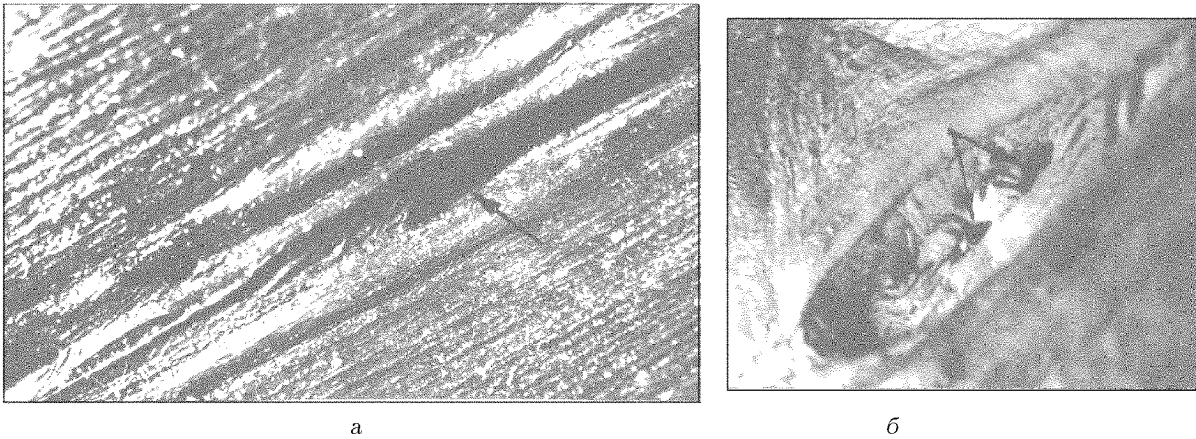


Рис. 5. Щели (а) и выводные протоки (б) на дорзальной стороне тела, увеличение 3-кратное

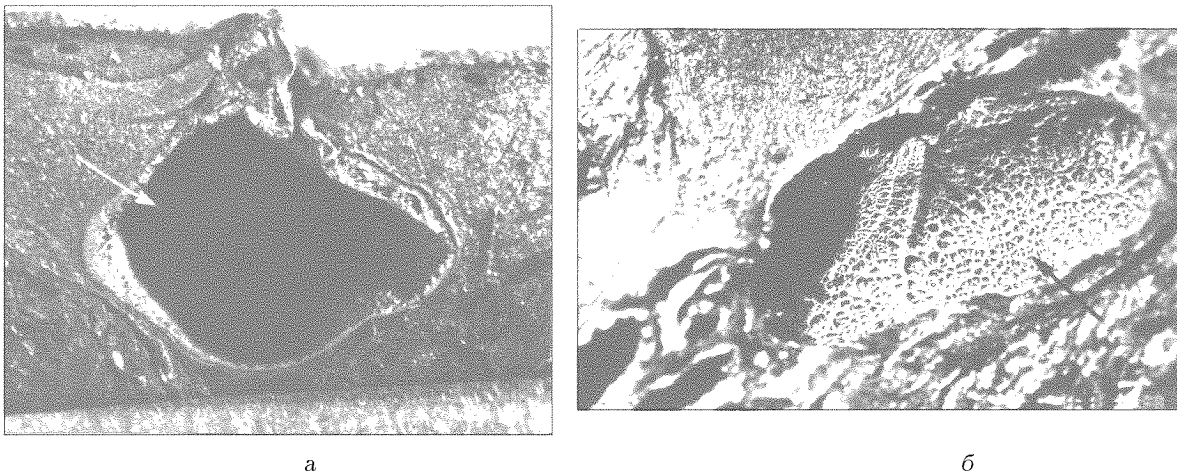


Рис. 6. Поперечное сечение (а) и внутренняя структура (б) ампулы, увеличение 6-кратное

лы в основном распределены по центру средней линии спины. Наблюдаются случаи, когда ампула смещена на правую или левую сторону из-за наличия в этом месте островков хрящевой ткани — остатков оснований лучей редуцированного спинного плавника. У рыбы длиной  $L = 1.57$  м обнаружено 24 ампулы, причем часть из них (14 шт.) относительно крупные с диаметром до 7 мм и длиной до 15 мм, и 10 шт. мелких с диаметром до 2-3 мм и длиной до 4 мм. С увеличением размеров рыбы значительно увеличивается и величина ампул. У меч-рыбы длиной  $L = 2.6$  м максимальный диаметр ампул достигает 18 мм с общей длиной до 30 мм. Мелкие ампулы расположены у основания выступающего первого спинного плавника, а крупные — за спинным плавником.

Полость ампул имеет сетевидную структуру (рис. 6). При гистологическом изучении строения различных участков ампул, их выводных протоков и стенок щелей обнаружено, что поверх-

ность их выстлана многослойным эпителием. Число клеточных рядов эпителия у рыбы длиной  $L = 2.6$  м достигала в отдельных участках 40. Большинство эпителиальных клеток превращаются в сплошное секреторное поле. Наличие многочисленных соединительно-тканых выростов, образующих сетевидную структуру полости ампул, значительно увеличивает секреторную поверхность. Огромное количество слизистых клеток на различных стадиях своего развития позволяет утверждать, что в выступающем эпителии ампул и даже в выводных протоках происходит активное и постоянное образование слизи, в результате чего в полости ампул всегда имеется запас слизистого вещества.

Плотная неоформленная соединительная ткань ампул значительно васкуляризована, тонкие кровеносные сосуды проникают и в отдельные соединительно-тканые выросты. Под слоем плотной неоформленной соединительной ткани (жесткого

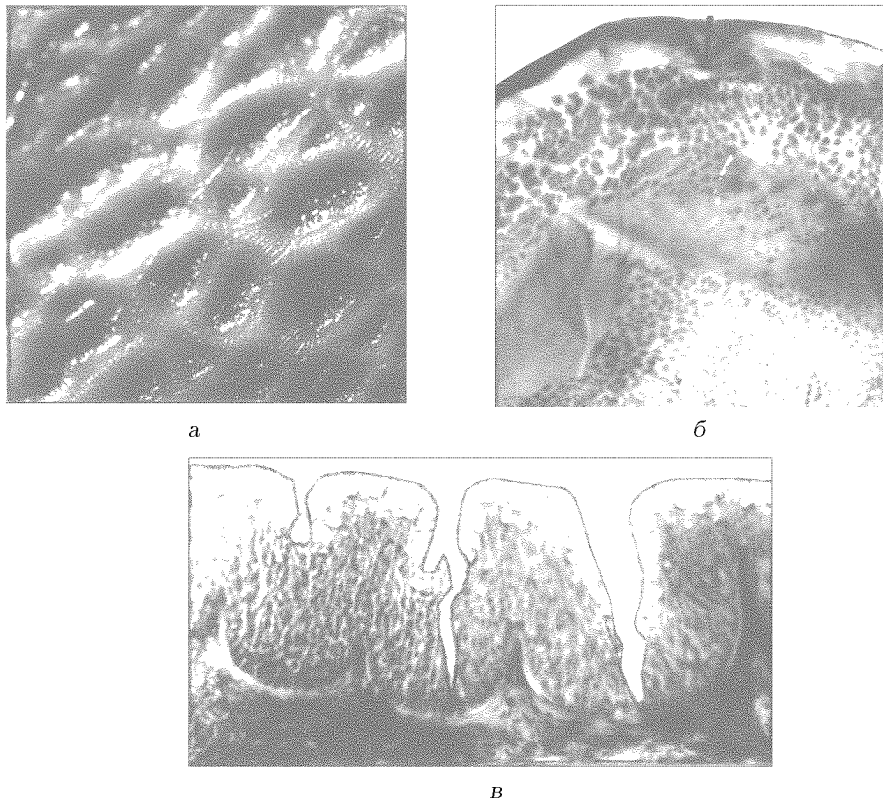


Рис. 7. Криптообразная структура кожи в районе жаберной щели (а), расположение криптообразных структур на внутренней стороне жаберных крышек (б), увеличение 6-кратное; поперечный разрез секреторного аппарата криптообразных структур (в), увеличение 300-кратное

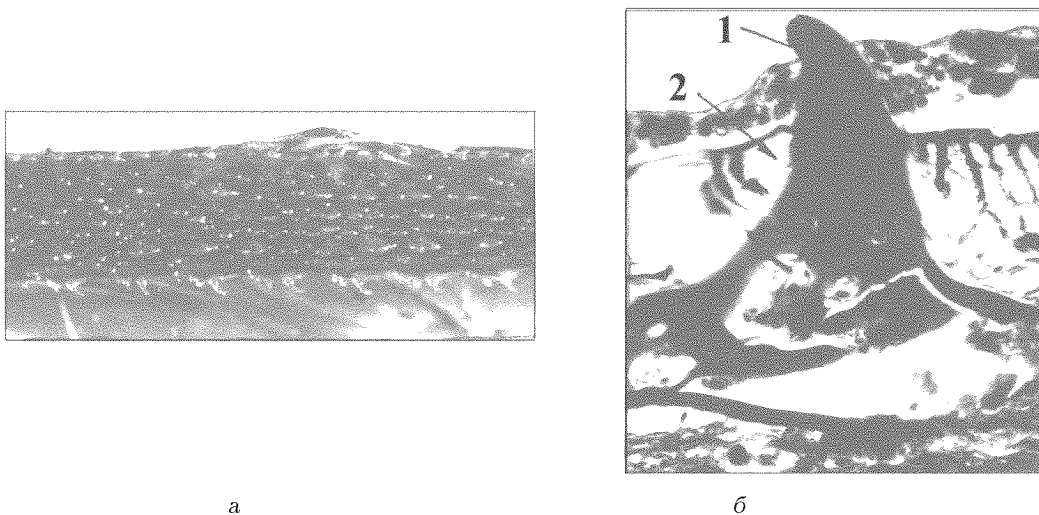


Рис. 8. Чешуя меч-рыбы:  
а - на теле рыбы длиной  $L = 1.2$  м, увеличение 3-кратное; б - в коже рыбы длиной  $L = 2.6$  м, увеличение 350-кратное

основания ампул) в основном расположена рыхлая соединительная ткань, с отдельными группами жировых клеток. В верхних участках ампул

(область выводящих протоков) слой плотной соединительной ткани без разрыва соединяется с плотной тканью кожного покрова, что дает осно-

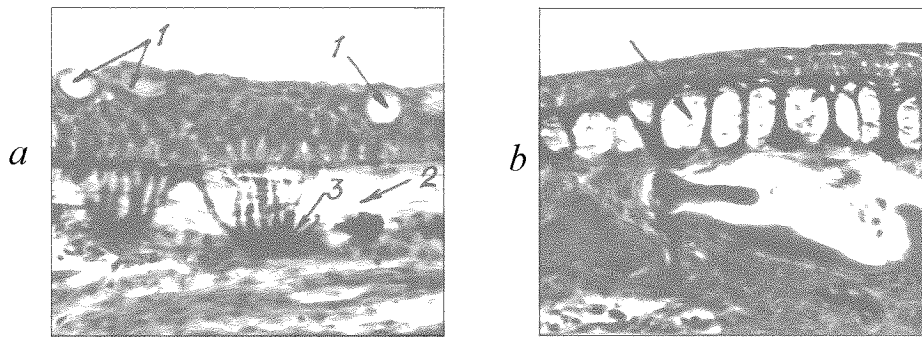


Рис. 9. Поперечный разрез кожи:  
а – секреторный аппарат эпидермиса, б – волокнистый пигментный слой, увеличение 250-кратное

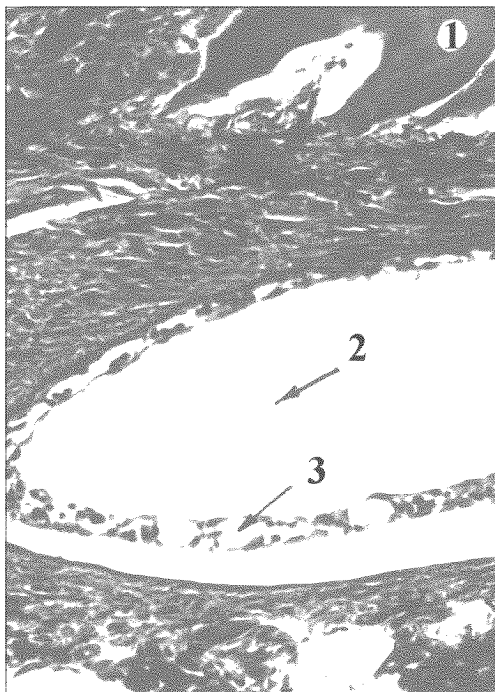


Рис. 10. Поперечный разрез подкожного канала, увеличение 300-кратное

вание утверждать, что ампулы являются производными кожи. У основания ампул залегают пучки локомоторной мускулатуры, которые при сокращении могут вызвать частичную деформацию стенок ампул, изменяя ее объем, т. е. способствуют выведению накопившегося слизистого вещества на поверхность тела.

#### 1.6. Строения кожи в районе жаберных щелей

В области жаберных щелей и на внутренней стороне жаберных крышек меч-рыбы обнаружены специфические структуры, которые напоминают

ют крипты желудка или кишечника (рис. 7, а). На поверхности тела криптообразные структуры располагаются относительно узкой полосой (3 ÷ 4 см) по краю жаберной щели, немного захватывая пространство под жаберной крышкой. На макроуровне эта структура состоит из сетевидно расположенных выростов плотной соединительной ткани кожи, между которыми лежит основная масса крипт.

На внутренней стороне жаберных крышек и даже на основаниях жаберных дуг имеются сходные криптообразные структуры. На жаберных крышках они рассредоточены практически по всей поверхности небольшими островками, существуют лишь два небольших участка в центре жаберной крышки, где они отсутствуют (рис. 7, б).

Клеточный состав криптообразных структур не отличается от клеточного состава эпидермиса кожного покрова. Он представлен двумя типами клеток: эпителиальными и секреторными. Размер эпителиальных клеток – 3 ÷ 5 мкм. Слизеобразующие клетки расположены в верхних слоях в большом количестве и в отдельных участках могут достигать 20 мкм. Толщина эпителиального слоя на выступах соединительной ткани небольшая (3 – 4 ряда), а внутри окаймленных участков она очень мощная и может насчитывать до 40 рядов эпителиальных и секреторных клеток (рис. 7, в).

#### 1.7. Чешуя в коже меч-рыбы

В кожном покрове молоди меч-рыбы имеется чешуя с развитым рельефом (рис. 8, а). Характер расположения чешуй на теле и их строение довольно полно описано в ряде работ [12, 23]. Показано, что тело этих рыб полностью покрыто чешуями, имеющими от двух до пяти конических игл. Основания чешуй лежат в плотной неоформленной



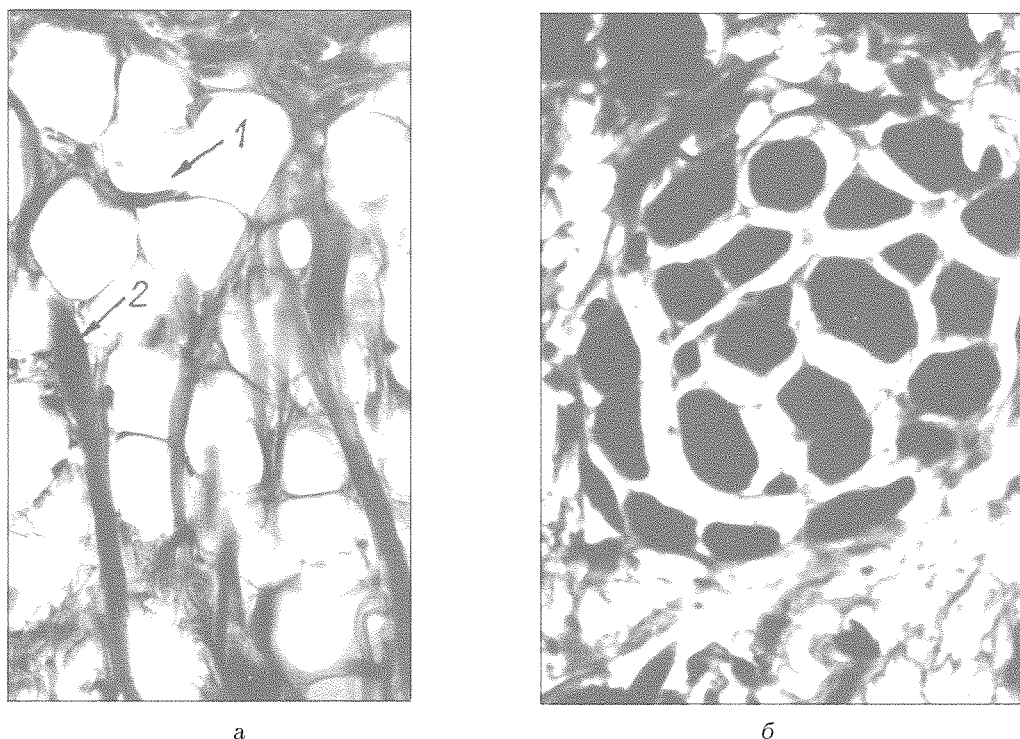


Рис. 11. Слой подкожной жировой клетчатки:  
1 – жировые клетки, 2 – соединительнотканые волокна, увеличение 300-кратное

соединительно-тканной основе кожного покрова, а на поверхности тела выходят лишь "колючки". Наиболее крупные колючки расположены на голове и окаймляют глазницу. Вдоль тела чешуя расположена несколькими продольными рядами: наиболее четко видны спинной, два боковых и один брюшной ряды, между которыми располагаются более мелкие чешуи, покрывающие все тело. По мере роста рыбы происходит видоизменение чешуи. У меч-рыбы длиной 0.69 м чешуя имеет вид мелких треугольников, налегающих друг на друга подобно черепице. На брюхе сохраняются ряды чешуи в виде костных бугорков. На этой стадии развития рыбы исчезли шипы и колючки на голове, хвостовом стебле и боковых частях тела. Предполагают, что чешуя у меч-рыбы исчезает полностью при длине около 1.5 м, однако, как показали наши исследования, чешуя с коническими выступами, прободающими все вышележащие слои кожи, довольно многочисленно встречается на теле у взрослой меч-рыбы длиной 2.6 м (рис. 8, б).

#### 1.8. Строение кожного покрова

Как уже отмечалось ранее, гистоструктура кожного покрова меч-рыбы намного сложнее, чем у других рыб, благодаря наличию в коже описан-

ных выше макрообразований. Эпидермис у меч-рыбы сходный с другими видами рыб и состоит из 8 – 10 рядов эпителиальных клеток, в толще которых на различных стадиях развития имеются многочисленные секреторные клетки овальной формы (рис. 9). Эпидермис лежит на тонкой базальной соединительно-тканной мембране, за которой находится хорошо выраженный так называемый "волокнистый пигментный слой", обнаруженный ранее у скомброидных рыб (пелагида, тунцы), плавающих в диапазоне чисел  $Re \leq 10^7$  [28]. Строение пигментного волокнистого слоя у всех этих рыб сходно и состоит из тонких, рыхло расположенных волокон в аморфной массе (рис. 9, б). В зависимости от участка кожи в этом слое находится большее или меньшее количество пигментных клеток, которые часто располагаются на пучках соединительной ткани, связывающей базальную мембрану с плотной неоформленной тканью собственно кожи в единую систему. Толщина пигментного волокнистого слоя часто превосходит толщину эпидермиса и нижележащей базальной мембраны. Под пигментным волокнистым слоем расположен второй слой неоформленной соединительной ткани, более мощный, чем у других видов рыб, в котором залегают основания зубовидных чешуи. Во многих участках тела в этом слое

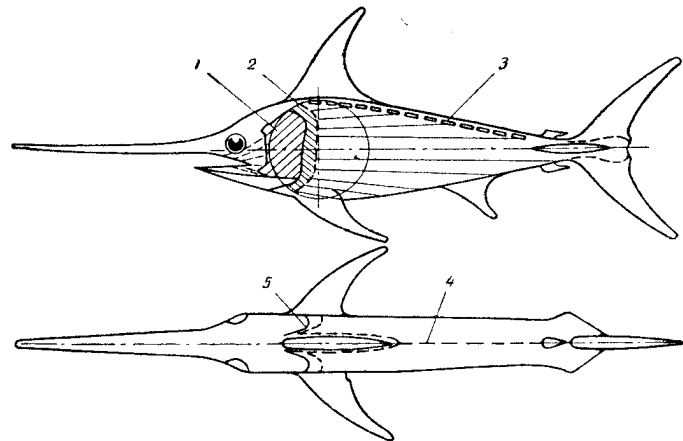


Рис. 12. Схема размещения жаберного аппарата и ампул на теле меч-рыбы:  
1 – жаберная крышка; 2 – криптообразная слизеобразующая структура [14]; 3 – ампулы в коже [13]; 4 – щели ампул; 5 – жаберная щель

наблюдается как резорбция, так и появление молодых зубовидных чешуй.

Ниже залегания оснований зубовидных чешуй располагаются многочисленные каналы (рис. 10), внутренняя поверхность которых выстлана многослойным эпителием. Толщина эпителия каналов значительно варьируется: в одних участках она состоит из 5 ÷ 6 рядов эпителиальных клеток, в других – из 2 ÷ 3. Так же, как и в эпидермисе кожи, среди эпителиальных клеток имеется большое количество клеток, выделяющих свой секрет в полость каналов. Часто на гистологических препаратах можно видеть, что в полости каналов находится мелкозернистая масса, состоящая из отмерших эпителиальных клеток.

Каналы имеют ответвления, которые направлены перпендикулярно к каналу и открываются на поверхности тела в виде пор. Эпителий, выстилающий каналы, плавно переходит в эти ответвления и поры, соединяясь с эпидермисом кожи.

Во втором соединительнотканном слое существуют обширные участки, заполненные крупными клетками с хорошо выраженной зернистостью. Эти клетки сопровождают мелкие кровеносные сосуды и нервные волокна, окружая их со всех сторон. Под этим слоем располагается слой хорошо развитой жировой клетчатки, в котором рыхло лежат мощные пучки коллагеновых волокон (рис. 11) и тонких волокон. Коллагеновые пучки (3 ÷ 4 пласта) строго ориентированы к продольной оси тела и составляют 45° между отдельными слоями. На границе между локомоторной мускулатурой и слоем подкожной жировой клетчатки располагаются многочисленные кровеносные сосуды и из-

редка встречаются отдельные мышечные пучки.

## 2. ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ СТРОЕНИЯ КОЖИ МЕЧ-РЫБЫ

Полученные результаты исследования особенностей строения кожи меч-рыбы показали существенное отличие от строения кожи других видов быстроплавающих рыб. Рассмотрим гидродинамические особенности строения кожи меч-рыбы. Известно, что сопротивление погруженных тел состоит из сопротивления формы, трения и донного сопротивления. При этом сопротивление трения может составлять 80% общего сопротивления тела. В соответствии с принципом взаимосвязанности [4, 5] при анализе какой-либо системы организма гидробионтов следует учитывать влияние на эту систему других систем тела.

### 2.1. Влияние мечевидного наконечника на снижение сопротивления

На рис. 12 приведена схема тела и некоторых особенностей строения кожи меч-рыбы. Были выполнены многочисленные эксперименты по гидробионическому моделированию работы систем организма гидробионтов. В частности, в [19, 29–32] экспериментально исследовалась роль мечевидного наконечника на снижение сопротивления продольно обтекаемых осесимметричных тел. На рис. 13 приведены результаты измерения сопротивления на теле вращения диаметром 40 мм длиной с оживальным наконечником 412 мм и удлинением 10.4 (эталон). Длины оживального и двух мечевидных наконечников составляли 20, 50 и 80 мм, а площади

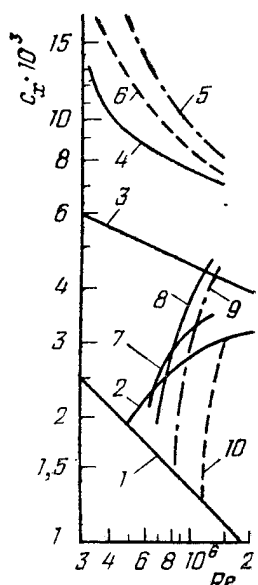


Рис. 13. Залежність коефіцієнта опору від числа Рейнольдса при різній формі носової частини моделі:

1, 2, 3 – опір гладкої продольно обтекаємої плоскої пластини відповідно при ламінарному, перехідному і турбулентному пограничних шарах [19]; 4, 5, 6 – опір моделі при живальній, короткій мечевидній і довгій мечевидній наконечниках [19]; при інжекції водного розчину полімерів з концентрацією 0.1%; 7, 8 – с живальним наконечником; 9 – с коротким мечевидним наконечником; 10 – с довгим мечевидним наконечником

смоленої поверхності моделей відповідно – 465, 468 і 471 см<sup>2</sup>. Діапазон чисел Рейнольдса становив  $3 \cdot 10^5 \div 1.5 \cdot 10^6$ . Вимірювання показали, що опір еталона був менше, ніж опір у моделей з мечевидними наконечниками. В [16, 17] експериментально показано, що мечевидний наконечник змінює розподіл тиску вздовж тіла таким чином, що зменшуються величини градієнтів тиску. Теоретичні і експериментальні дослідження інших авторів (см. табл. 1) показали, що з ростом швидкості і довжини мечевидного наконечника опір моделі може бути менше еталона на 10%. На основі цих даних можна зробити висновок, що меч-риба при  $Re = 10^8$  за рахунок перерозподілу тиску вздовж тіла зменшує бокові відчуття в районі великих градієнтів тиску. Це важливо і для виробництва слизу в шкірі меч-риби. Відомо, наприклад, що при обтеканні пластини розподіл касательних напружень вздовж пластини такий, що максимальне значення нахо-

диться в початку пластини, а потім різко по експоненціальному закону зменшується. Таким чином, у меч-риби максимальне значення величини касательного напруження припадає на мечевидний наконечник. Його площа поверхності мала порівняно з площею решти тіла. Це призводить до того, що сумарна величина касательного опору тіла зменшується, так як в районі тіла величина касательного опору зменшується на порядок. Поверхня наконечника і голови до кінця жаберних щелей тверда, тому все це призводить до суттєвого зменшення бокових відчуттів на тілі при великих швидкостях плавання.

Експерименти показали [19], що коли модель випробовувалася в сильно аерованому потоці, опір моделей з мечевидними наконечниками став менше, ніж у еталонної моделі, а опір моделі з довгим наконечником був мінімальним.

Усі ці вимірювання і розрахунки проводилися при так званому частковому моделюванні, коли особливості будови тіла гідробіонта моделювалися частково. Меч-риба рухається з відкритим ротом так, що через жаберний апарат на тіло інжектується за жаберною щелею потік, частково наповнений в жабрах розчинами слизу. Було виконано більш повне моделювання, коли на моделях через кільцеву щель в носовій частині інжектувалася вода і розчини полімерів різної концентрації [29, 30]. Отримані результати суттєво відрізнялися від отриманих раніше [19]. На вказаному вище тілі обертання організовувалася щель на відстанях від початку моделей, рівних довжинам вказаних трьох наконечників. Еталонні криві для трьох видів наконечників, обладнаних турбулізаторами, розташовані суттєво вище кривої опору плоскої пластини при турбулентному режимі обтекання (рис. 13). При інжекції розчинів полімерів з концентрацією 0.1% коефіцієнти опору моделей зменшилися більш, ніж в 3 рази, і досягли кривих для перехідного і ламінарного законів опору плоскої пластини. Чим більше довжина наконечника, тим ефективніше зменшується опір. Обнаружено, що інжекція води не впливала на зменшення опору моделі. Таким чином, ці результати показали, що крім позначених вище ефектів, мечевидні наконечники суттєво зменшують опір при інжекції розчинів полімерів. В [31 і др.] утверджується, що слизове речовина більшості риб сприяє зменшенню опору. Механізм такого зменшення опору

вления двойки. С одной стороны, клетки слизи рыб организуют такой покров, который по своим свойствам подобен упруго-демпфирующему покрову кожи дельфинов [19, 32]. С другой стороны, клетки слизи живых рыб, взаимодействуя с водой, организуют растворы, подобные растворам полимеров. Косвенным подтверждением этому являются полученные результаты инъекции растворов полимеров при наличии мечевидных наконечников. Очевидно, что в этом случае будет перераспределяться распределение давления и касательного сопротивления вдоль тела еще более эффективно, что еще больше уменьшит болевые ощущения на теле, вызываемые гидродинамическим полем окружающей среды.

## 2.2. Особенности истечения жидкости через жаберную щель

Из гидродинамики известно, что очень важным является, чтобы скорость истечения жидкости через жаберную щель в районе задней кромки была соизмерима со скоростью основного потока в этом месте. Для этого структура жаберного аппарата должна быть такой, чтобы скорость потока при течении внутри жабер не уменьшалась. Жаберный аппарат снабжен слизеобразующими клетками, снижающими сопротивление. Кроме того, строение жаберного аппарата такое, что оно способствует истечению жидкости из жаберной щели в виде системы продольных вихрей. Известно, что возмущения пограничного слоя, имеющие подобную вихревую структуру, более устойчивы и способствуют снижению сопротивления. Как видно из рис. 15, за жаберной щелью имеется зона с повышенным содержанием слизеобразующих клеток. Это способствует выравниванию значения указанных скоростей в районе задней кромки жаберной щели, уменьшает скачок сдвиговых напряжений, а также повышает устойчивость продольных вихревых систем, сформированных при обтекании жаберного аппарата. Эти особенности жаберного аппарата исследованы в [33, 34].

## 2.3. Структура возмущений в пограничном слое кожных покровов меч-рыбы

Строение кожных покровов гидробионтов выработалось под влиянием возмущающего движения пограничного слоя при характерных скоростях движения. Чтобы определить вид и структуру возмущающего движения были исследованы закономерности формирования и особенности развития возмущений в пограничном слое жесткой пластины при различных скоростях и режимах ее об-

текания [19, 35]. В [35] приведен макет развития возмущающего движения на различных этапах его развития. Наиболее характерными и устойчивыми возмущениями являются плоские волны Толлмина-Шлихтинга и системы продольных вихрей типа Бенни-Линя.

В [19, 32] были исследованы особенности развития возмущающего движения в пограничном слое на различных видах эластичных пластин, моделирующих строение кожных покровов гидробионтов. Было обнаружено, что форма и характерные особенности возмущений при этом существенно отличались от таковых на жесткой пластине и тем больше, чем полнее моделировался кожный покров гидробионтов.

Сравнение строения кожи дельфинов, акул и других скоростных рыб [1- 8], несмотря на существенные отличия, позволило выявить и ряд общих закономерностей в их строении, так как структура их кожных покровов выработалась под действием силового поля одной и той же окружающей среды. У гидробионтов выработаны одинаковые механизмы восприятия одних и тех же силовых воздействий окружающей среды. Но у различных гидробионтов морфологическое строение таких механизмов различное. В связи с тем, что у акул каждая чешуя снабжена кровеносными сосудами, чешуйчатый покров гибкий и снаружи покрыт слизью. Поэтому их наружный покров обладает подобными упруго-демпфирующими свойствами, как и у китообразных. С ростом скорости движения изменяется строение наружного покрова. Так, у скоростных рыб типа тунцов имеется частично чешуйчатый покров, и частично упруго-демпфирующий, как у дельфинов. Чешуйчатый покров расположен у них в задней части тела в районе более силового воздействия окружающей среды. И самые скоростные гидробионты парусниковые и меч-рыбы имеют бесчешуйчатый упруго-демпфирующий покров, как у китообразных. Характерно, что у молодки меч-рыбы наружный покров имеет чешую. При увеличении массы тела взрослых рыб увеличивается скорость и чешуйчатый покров редуцирует.

В строении наружных покровов всех скоростных гидробионтов обнаружены поперечные структуры: микроскладки на поверхности кожи дельфинов; аналогичные микроскладки, образованные гребнями чешуй акул и других рыб в поперечном направлении; поперечные каналы в коже меч-рыбы (рис. 4). Одновременно имеются явно выраженные структурные образования в кожных покровах в продольном направлении: дермальные валики и

продольные ряды эпидермальных сосочков в коже китообразных; продольные ряды гребней чешуи акул; продольные складки на поверхности тела меч-рыбы (см. рис. 2, 5).

Для определения гидродинамической роли этих микроструктур были выполнены соответствующие расчеты [36]. Оказалось, что при колебательном движении тела во время плавания указанные поперечные структуры генерируют в пограничный слой волновые возмущения типа волн Толлмина-Шлихтинга. Результаты расчетов, выполненные для различных гидробионтов и для различных характерных скоростей движения, были нанесены на диаграмму нейтральной кривой в координатах безразмерной частоты колебания указанных волн и числа Рейнольдса. Для всех рассмотренных гидробионтов генерируемые их кожными покровами возмущения на диаграмме нейтральной кривой оказались расположенными в области устойчивости [36].

Были выполнены также расчеты устойчивости продольных вихревых возмущений, генерируемых в пограничный слой при помощи продольных микроскладок кожных покровов гидробионтов. При колебательном движении тела попеременно на теле формируется область выпуклости и вогнутости. Расчеты характеристик образованных при этом продольных вихревых систем, генерируемых в пограничный слой, показали, что на диаграмме Гертлеровской нейтральной кривой для всех гидробионтов они располагаются в области устойчивости. При этом нами экспериментальным путем впервые была получена нейтральная кривая для эластичной пластины. Расчетные точки для парусниковых и меч-рыбы на графике Гертлеровской нейтральной кривой располагались в области неустойчивости вблизи нейтральной кривой. Но в этих расчетах не учитывалось влияние растворов слизи на вихревые структуры пограничного слоя. Из модельных экспериментов известно, что растворы полимеров существенно стабилизируют продольные вихревые структуры. На основании этого можно считать, что совместное влияние эластичных покровов и растворов слизи на характеристики пограничного слоя приведут и в этом случае к стабилизации продольных вихрей в пограничном слое. Модельный эксперимент комплексного влияния эластичных покрытий и растворов полимеров [32, 40] показал их суммарное воздействие на снижение сопротивления и подтвердил эту гипотезу.

#### 2.4. Взаимодействие возмущений в пограничном слое гидробионтов

Строение кожи скоростных гидробионтов такое, что способствует существованию в пограничном слое различных типов устойчивых вихревых возмущений. Впервые было обнаружено, что эти возмущения взаимодействуют друг с другом. Для выяснения закономерностей такого взаимодействия выполнены многочисленные экспериментальные исследования взаимодействия различных возмущений, генерируемых в пограничный слой со стороны его различных границ [32, 35]. Разработаны методика и различные приспособления для проведения таких экспериментов. Исследовалось взаимодействие как одинаковых, так и различных плоских и трехмерных возмущений, генерируемых в пограничный слой с различных сторон. Эти исследования проводились как на жесткой пластине, так и на различных видах эластичных пластин, моделирующих кожные покровы различных гидробионтов [32]. Получены следующие основные выводы: даже равномерная эластичная пластина способствует формированию в пограничном слое системы продольных вихрей. Взаимодействие плоских и трехмерных возмущений приводит к ускоренному формированию в пограничном слое устойчивых продольных вихрей. Продольные вихревые системы наиболее благоприятны для снижения сопротивления в широком диапазоне чисел Рейнольдса.

У меч-рыбы за счет строения жабер и продуцирования слизистого вещества сразу за жаберной щелью в пограничном слое формируются продольные вихревые системы, устойчивость которых определяется продольными складками на поверхности кожи, заполненными слизью, подаваемой на поверхность через поры (см. рис. 2, 3).

#### 2.5. Гидродинамическое значение толщины кожи гидробионтов

При экспериментальных исследованиях пограничного слоя на эластичных поверхностях было обнаружено, что толщина эластичной поверхности, на которую проникают возмущения из пограничного слоя, зависит от толщины пограничного слоя. Действительно, глубина распространения возмущений в эластичном материале зависит от энергии возмущений, поступающих на поверхность материала из пограничного слоя. Энергия возмущения определяется скоростью потока, шероховатостью и кривизной пластины. Толщина пограничного слоя определяется этими же параметрами. Таким образом, существует диапазон

оптимальных значений параметра, определяемого толщинами пограничного слоя и обтекаемого эластичного материала. В свою очередь, толщина материала определяется его структурой, механическими характеристиками и конструкцией обтекаемой пластины. Поэтому в технике такой параметр может иметь широкий диапазон значений. В природе этот комплексный параметр имеет оптимальный диапазон значений. Измерения показали, что при обтекании дельфинов оптимальным для стабилизации возмущений в ламинарном и переходном пограничных слоях является соотношение

$$h_i \approx (1 \div 4)\delta,$$

где  $h_i$  — толщина колеблющейся массы кожи, т. е. величина, на глубину которой распространяются колебания пограничного слоя.

В [37] для скоростных гидробионтов получены эмпирические зависимости

$$h_i = f(x),$$

$$h_i/\delta_i = \psi(x/L),$$

где  $x$  — расстояние вдоль тела гидробионта;  $L$  — длина тела;  $\delta_i$  — характерная толщина пограничного слоя. Получена эмпирическая формула для  $x/L = 0 \div 0.5$ :

$$\lg(h_i/\delta_i) = \lg 1.28 \div 2.4 \lg(x/L).$$

Таким образом, получена единая закономерность для рассмотренных быстроплавающих гидробионтов. Численные значения параметра  $h_i/\delta_i$  в указанном диапазоне  $x/L$  имеют значения

$$h_i/\delta_i = 0.6 \div 1.28$$

## 2.6. Механизмы экономного расходования слизи кожных покровов

Из вышеизложенного становится очевидным, что слизь меч-рыбы несет несомненно функцию снижения сопротивления трения подобно растворам полимеров, которые давно нашли применение в технике. Отличие состоит в том, что слизь, продуцируемая на поверхность кожи меч-рыбы, удерживается в продольных складках за счет формирования на обтекаемой поверхности продольных вихрей. Известно [35], что если рассмотреть систему продольных вихрей в поперечном сечении, то между одной парой вращающихся по винтовой линии продольных вихрей поток вымывается от стенки, а между соседней парой вихрей направлен к стенке. Здесь образуется застойная продольная

область. Кроме того, в поперечном сечении продольных вихрей существует большая зона с профилями скорости, имеющими перегибы, где трение на стенке минимальное. Таким образом, формируются участки заторможенной области, где слизь не вымывается потоком, что приводит к экономному расходованию слизистого вещества. За счет движения в продольных вихрях по винтовой линии в участках, где течение идет от стенки, слизистое вещество как бы растягивается поперек потока. Слизь постепенно диффундирует по толщине пограничного слоя и, что самое главное, удерживается в пристеночной области. Опыты с растворами полимеров показали, что полимеры эффективно снижают сопротивление при низкой концентрации раствора, если они располагаются в ламинарном подслое турбулентного пограничного слоя.

Процесс образования слизи и ее подача на поверхность тела из слизиобразующих клеток растянут во времени. Продуцирование слизи только в поверхностном слое кожи не может в достаточном количестве вырабатывать и подавать биополимер в пограничный слой при длительном и скоростном плавании. В связи с этим в коже появляется дополнительная слизиобразующая система — каналы с выводными протоками, где вырабатывается и накапливается слизистое вещество (см. рис. 4). Расчеты показывают, что площадь эпителия каналов, где вырабатывается слизь, соизмерима с площадью эпидермиса и может продуцировать такое же количество слизи.

Слизистое вещество, накопившееся в полости каналов, выходит на поверхность кожи через поры (см. рис. 3) и расходуется более экономно, чем слизь, вырабатываемая эпидермисом. Это связано с тем, что системы каналов левой и правой сторон тела рыбы разобщены между собой и, поскольку при изгибах тела отверстия пор уменьшаются на вогнутом участке, то слизь поступает на поверхность, в основном, с противоположной стороны. Таким образом, с частотой колебания тела система пор открывается с каждой стороны тела поочередно. В минимизации расхода слизи играет роль и особое расположение каналов и пор. Каналы, располагаясь перпендикулярно к оси тела и имея небольшое количество анастомозов между ними, позволяют перераспределять слизистое вещество в полостях каналов более экономно, чем если бы они располагались вдоль тела, так как слизь выходит на поверхность кожи под влиянием распределения давления вдоль тела в процессе движения с учетом колебания хвостовой части тела.

Количество пор на теле на единицу площади

распределено практически равномерно (табл. 2) и только за выступающим спинным плавником увеличивается почти в два раза.

### 2.7. Комбинированный метод снижения сопротивления

В [32] экспериментально исследован комбинированный метод снижения сопротивления, который применяют меч-рыбы и другие быстроплавающие гидробионты. Это – одновременное использование влияния эластичных покрытий и растворов полимеров на снижение сопротивления трения. Были также проведены измерения сопротивления осесимметричного продольно обтекаемого цилиндра, кроме этих двух методов, на модели устанавливался мечевидный наконечник [32]. Технические решения результатов взаимодействия различных возмущений в пограничном слое и комбинированного метода снижения сопротивления приведены в [38-40]. Полученные результаты показали, что при использовании комбинированного метода снижения сопротивления эффективность каждого метода дополняет друг друга так, что суммарная эффективность равна сумме эффективностей отдельных методов снижения сопротивления.

### 2.8. Методы стабилизации вихревых возмущений

При обтекании выступающего на теле плавника, какой бы обтекаемой формы он не был, в угловой части между телом и плавником возникают вихревые системы, увеличивающие сопротивление и снижающие эффективность работы движителя. Для стабилизации этих возмущений наличие слизи, вырабатываемой эпидермисом и каналами в коже, уже недостаточно. За вертикальным плавником помимо большого количества пор, у меч-рыбы появляется цепочка ампул, где также, как и в каналах, образуется и накапливается слизь, которая через выводящие протоки поступает на поверхность тела в область за плавником. Чем выше скорость плавания, тем больше расход накопленного в полости ампул биополимера. При маневрах увеличивается интенсивность вихревых систем за плавником. При изгибе тела из ампул со стороны изгиба продуцируется дополнительное количество слизи. Таким образом, функционирует саморегулирующееся экономное расходование биополимера.

Для стабилизации вихревых возмущений, возникающих при обтекании боковых плавников играют роль криптообразные структуры, которые вы-

делят слизистое вещество. Эти структуры расположены на внутренней стороне жаберных крышек (см. рис. 9) и на теле за жаберными крышками (см. рис. 8, 15). За счет уменьшения сопротивления потока в районе этих криптообразных структур вытекающий из жаберных щелей поток "сдувает" и стабилизирует эти вихревые возмущения. Выше были рассмотрены морфологические приспособления для снижения сопротивления двух компонент сопротивления – формы тела и трения, а также для снижения вихревого сопротивления формы, вызываемого расположением на теле выступающих частей (вертикального и боковых плавников). Донное сопротивление у гидробионтов при активном плавании отсутствует, так как хвостовая часть тела и хвостовой плавник являются движителем, который создает не только тягу, но и подсасывающую силу и при этом попеременно с обеих сторон уменьшает сопротивление в хвостовой части стебля.

### 2.9. Оптимальная площадь хвостового движителя

В [5, 36] приведены результаты расчетов площади хвостовых плавников быстроплавающих гидробионтов в зависимости от длины и массы тела. Энерговооруженность гидробионтов и скорость движения зависят от массы локомоторных мышц, которая пропорциональна длине и общей массе тела. Для приведения в движение тела с определенной массой необходимо иметь оптимальную площадь хвостового плавника. В технике аналогичным образом для каждого аппарата рассчитывается оптимальный размер винта.

У меч-рыбы обнаружена еще одна специфическая особенность. При колебательном движении хвостового машущего движителя хвостовая часть тела попеременно изгибается. При этом на напорной вогнутой части стебля под действием центробежных сил формируется в пристеночной области система продольных гертлеровских вихрей, предотвращающих отрыв и снижающих сопротивление. На другой выпуклой стороне стебля формируется положительный градиент давления, который может привести к отрыву потока. Эксперименты показали [35], что создание на теле продольных вихрей способствует предотвращению отрыва в кормовой части тела. Кроме того, в кормовой части тела у меч-рыбы имеются две пары стабилизирующих плавничков, которые при колебании хвостового плавника предотвращают отрыв перед ним, разрушают вихревые структуры и, тем самым, выравнивают поток, набега-

ющий на хвостовой плавник. Это приводит к повышению к. п. д. машущего плавникового двигателя. Некоторые технические решения для стабилизации потока в хвостовой части тела за счет формирования системы продольных вихрей приведены в [41, 42].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сравнительный анализ показал, что в строении кожных покровов и тела быстроплавающих гидробионтов имеются как одинаковые приспособления к снижению сопротивления и экономному расходованию энергии, так и специфические образования, выработанные в соответствии с характерными скоростями плавания. Обнаружено новое неизвестное ранее свойство и гидродинамическое значение мечевидного наконечника и системы для производства и транспортировки слизи в коже меч-рыбы.

Результаты систематических исследований особенностей строения кожных покровов меч-рыбы по всей длине тела, включая и жабры, позволили обнаружить новые структурные образования, указывающие на специфическую роль слизи. Обнаружен комплекс методов, направленных на экономичное расходование слизи и оптимальное расположение растворов слизи по толщине пограничного слоя.

На основании гидробионического моделирования экспериментальным путем проверены некоторые из обнаруженных особенностей тела и кожи меч-рыбы. Расчетным путем проанализировано гидродинамическое значение микро-складок на поверхности кожи меч-рыбы и толщины кожи, а также площади хвостового двигателя меч-рыбы в сравнении с другими видами гидробионтов. На основании гидродинамического анализа некоторых особенностей строения тела меч-рыбы разработаны и экспериментально исследованы метод взаимодействия различных возмущений в пограничном слое и комбинированный метод снижения сопротивления.

Разработаны некоторые технические решения обнаруженных особенностей строения тела и кожных покровов меч-рыбы, защищенные авторскими свидетельствами и патентами.

1. Козлов Л. Ф. Теоретическая биогидродинамика.– Киев: Вища школа, 1983.– 240 с.
2. Першин С. В. Основы гидробионики.– Л.: Судостроение, 1988.– 263 с.
3. Бабенко В. В., Соколов В. Е., Козлов Л. Ф., Першин С. В. и др. Свойство кожи китообразных активно регулировать гидродинамическое сопротивление плаванию посредством управления локальным взаимодействием кожного покрова с обтекающим потоком // Открытие СССР.–1982.– М.:ВНИИПИ.– 1983.– С. 41.
4. Бабенко В. В. Гидробионические принципы снижения сопротивления // Прикладна гідромеханіка.– 2000.– 2, N 74.– С. 3–17.
5. Babenko V. V., Carpenter P. W. Dolphin hydrodynamics // Flow past Highly Compliant Boundary and in Collapsible Tubes.– Proc. of the IUTAM Symposium held at the University of Warwick, UK, 26-30 March 2001. -Fluid Mechanics and its Applications, 72. Kluwer Academic Publishers. -Dordrecht/Boston/London, 2003.– P. 293–323.
6. Першин С. В., Чернышов О. Б., Козлов Л. Ф., Коваль А. П., Заяц В. А. Закономерности в покровах скоростных рыб // Бионика.– 1976.– N 10.– С. 3–21.
7. Козлов Л. Ф., Першин С. В. Комплексные исследования активного регулирования кожей дельфинов снижения гидродинамического сопротивления // Бионика.– 1983.– N 17.– С. 3–12.
8. Коваль А. П., Заяц В. А., Калужная Т. А. Морфологические особенности строения кожного покрова рыб различных скоростных групп // Бионика.– 1987.– N 21.– С. 77–84.
9. Тарасенко В. Ф., Бабенко В. В. Плавниковый двигатель для лодок // Авт. свид. N 796074.– 1981.– Оpubл. 15.01.81.– С. Бюл. 2.
10. Бабенко В. В., Юрченко Н. Ф. Демпфирующее покрытие // Авт. свид. N 802672.– 1981.– Оpubл. 07.02.81.– С. Бюл. 5.
11. Proceedings of the International Symposium on Seawater Drag Reduction.– 22-23 July 1998: Newport, Rhode Island, USA, 1998.– 494 p.
12. Овчинников В. В. Меч-рыба и парусниковые.– Калининград: Атлант НИРО, 1970.– 296 с.
13. Овчаров О. П. О гидродинамических функциях жаберного аппарата меч-рыбы // Бионика.– 1982.– N 16.– С. 11–15.
14. Коваль А. П. Криптообразные слизиобразующие структуры кожи и жаберных крышек меч-рыбы // Бионика.– 1978.– N 12.– С. 108–111.
15. Чернышов О. Б., Коваль А. П., Дробаха А. А. Некоторые особенности морфологии жаберного аппарата рыб, связанных со скоростью их плавания // Бионика.– 1978.– N 12.– С. 103–108.
16. Золотов С. С., Ходорковский Я. С. Особенности сопротивления трения тела меч-рыбы // Бионика.– 1973.– N 7.– С. 14–18.
17. Леоненко И. В. О гидродинамическом значении раструма меч-рыбы // Бионика.– 1974.– N 8.– С. 21–23.
18. Протасов В. Р., Старосельская А. Г. Гидродинамические особенности рыб. Атлас.– М.: Наука, 1978.– 103 с.
19. Козлов Л. Ф., Бабенко В. В. Экспериментальные исследования пограничного слоя.– Киев: Наукова думка, 1978.– 184 с.
20. Першин С. В. Биогидродинамический феномен меч-рыбы как предельный случай скоростных гидробионтов // Бионика.– 1978.– N 12.– С. 40–48.
21. Коваль А. П., Бутузов С. В. Некоторые особенности микрорельефа поверхности хвостового плавника синего марлина и большеглазого тунца // Бионика.– 1991.– N 24.– С. 88–91.



22. Коваль А. П., Кошовский А. А. Строение теплообменника тунцов различных скоростных групп // Бионика.– 1992.– N 25.– С. 94–98.
23. Arata G. F. J. A note on the flying behaviour of certain Lquids // *Naytilus*.– 1954.– **69**.– P. 1–3.
24. La Monte F. R. Scales of the Atlantic Species of Makaira // *Bull Am. Mus. Nat/Hist.*– 1958.– **114**.– P. 381–395.
25. Walters V. The trachipterod integument and an hypothesis on it hydrodynamic function // *Coreia*.– 1963.– .– P. 260–270.
26. Коваль А. П. Шероховатость и некоторые особенности строения кожи меч-рыбы // Бионика.– 1987.– N 6.– С. 73–77.
27. Коваль А. П. Гистоструктура кожного покрова парусника и меч-рыбы // Бионика.– 1982.– N 16.– С. 21–27.
28. Чернышев О. Б., Коваль А. П. Особенности строения кожного покрова пелагиды // Бионика.– 1977.– N 11.– С. 83–86.
29. Бабенко В. В., Коваль А. П. О гидродинамических функциях жаберного аппарата меч-рыбы // Бионика.– 1982.– N 16.– С. 11–15.
30. Бабенко В. В. Об одном механизме обтекания водных животных // Бионика.– 1983.– N 17.– С. 39–45.
31. Хойт Дж. Снижение гидродинамического сопротивления рыбеи слизью // Биогидродинамика плавания и полета.– М. Мир, 1980.– С. 128–146.
32. Бабенко В. В., Канарский М. В., Коробов В. И. Пограничный слой на эластичных пластинах.– Киев: Наукова думка, 1983.– 263 с.
33. Babenko V. V. Method for reducing dissipation rate of fluid ejected into boundary layer.– United States Patent: N 6, 138, 704.– Oct. 31, 2000.
34. Babenko V. V. Apparatus for reducing dissipation rate of fluid ejected into boundary layer.– United States Patent: N 6, 237, 638 B1.– May 29, 2001.
35. Козлов Л. Ф., Цыганок А. И., Бабенко В. В. и др. Формирование турбулентности в сдвиговых течениях.– Киев: Наукова думка, 1985.– 284 с.
36. Бабенко В. В. О взаимодействии гидробионтов с потоком // Бионика.– 1992.– N 25.– С. 1–11.
37. Бабенко В. В., Коваль А.П. О гидродинамических свойствах кожных покровов водных животных // Бионика.– 1989.– N 23.– С. 38–42.
38. Бабенко В. В., Козлов Л. Ф., Першин С. В. Демпфирующее покрытие. // Авт. свид. N 413286. –1974. –Опубл. 30.1.74. Бюл. N 4.
39. Бабенко В. В., Козлов Л. Ф., Коробов В. И. Демпфирующее покрытие. // Авт. свид. N 483538. –1975. –Опубл. 05.09.75. Бюл. N 33.
40. Бабенко В. В., Козлов Л. Ф., Коробов В. И. Регулируемое демпфирующее покрытие. // Авт. свид. N 597866. –1978. –Опубл. 15.03.78. Бюл. N 10.
41. Полищук С. В., Бабенко В. В., Майстер В. И. Подводный аппарат с плавниковым двигателем. // Авт. свид. N 41724А. –2001. –Опубл. 17.09.2001. Бюл. N 8.