

ПОДВИЖНАЯ ШЕРОХОВАТОСТЬ НА ПОВЕРХНОСТИ ТЕЛА НЕКТЁРОВ КАК СПОСОБ СНИЖЕНИЯ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ

Ю. Г. АЛЕЕВ

Институт биологии южных морей Академии наук Украинской ССР (Севастополь)

На основании экспериментального изучения картины обтекания тела дельфина и человека с помощью подводной киносъемки показана возможность пассивного образования подвижной шероховатости в коже Mammalia исключительно за счет действия внешних гидродинамических сил. Отмечается, что эта подвижная шероховатость — бегущие волны деформации в коже — способствует снижению гидродинамического сопротивления.

Одним из свойственных нектёрам способов уменьшения гидродинамического сопротивления является создание на поверхности тела подвижной шероховатости. К настоящему времени это явление инструментально показано только для дельфинов (Delphinidae). С помощью подводной киносъемки было констатировано (Essarian, 1955), что в моменты резких ускорений на поверхности кожи дельфина, в частности

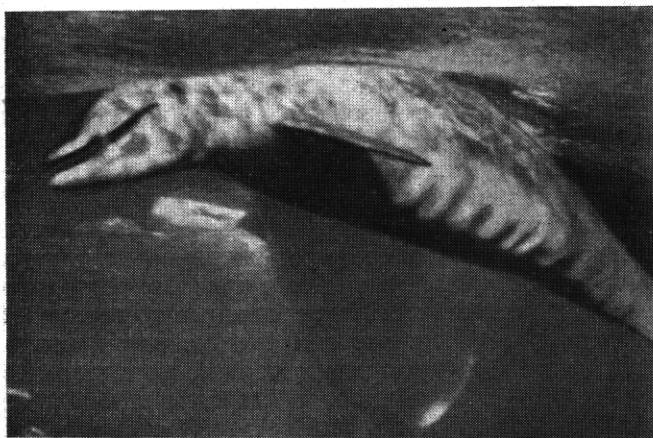


Рис. 1. Волнообразные складки на коже, появившиеся у дельфина (*Tursiops*) в момент быстрого броска при схватывании добычи (по Essarian, 1955)

на брюшной поверхности тела, в некоторых случаях возникают волнообразные складки, продвигающиеся в коже в направлении от переднего конца тела к заднему (рис. 1). Предполагается (Essarian, 1955; Соколов, 1962; Sokolov et al., 1969; Томилин, 1962; Бабенко, Суркина, 1969; Бабенко и др., 1969 и др.), что эти подвижные волны, продвигающиеся

в коже, способствуют уменьшению гидродинамического сопротивления за счет сброса возникающих вихрей к кормовой оконечности тела.

Высказывалось предположение (Алеев, 1963), что аналогичный способ снижения сопротивления в какой-то мере свойствен, возможно, некоторым быстрым рыбам, частично или почти полностью утратившим чешуйный покров — таким, как некоторые тунцы. В последнее время А. Ф. Кудряшовым и В. В. Барсуковым (1967, 1967а) была выдвинута гипотеза, согласно которой при плавании рыб чешуйный покров, сложенный из тонкой циклоидной или ктеноидной чешуи, в совокупности с покрывающей его слизью под действием внешних гидродинамических сил способен образовывать подвижную шероховатость, наличие которой снижает гидродинамическое сопротивление. Очевидно, что возникновение на поверхности тела при плавании подвижной шероховатости, способствующей снижению гидродинамического сопротивления, в принципе возможно для представителей самых различных групп nektona, поверхность тела которых характеризуется достаточной эластичностью.

По поводу самого механизма образования на поверхности кожи дельфина «бегущей волны» были высказаны различные предположения. По мнению В. Е. Соколова (Соколов, 1962; Sokolov et al., 1969), крупные складки кожи (рис. 1) возникают за счет действия подкожной и туловищной мускулатуры, а мелкие — за счет разной плотности эпидермиса над рядами дермальных сосочков и между ними. После ликвидации местного возмущения обтекающего потока — при остановке дельфина или при замедлении движения — складки на поверхности тела уничтожаются, т. е. кожа благодаря упругости сети эластиновых волокон приобретает обычную форму. В. В. Бабенко и Р. М. Суркина (1969) полагают, что продвигающиеся в коже дельфина волны на боковых поверхностях тела кратковременно могут создаваться за счет сокращения с разной частотой отдельных порций кожной мышцы, однако считают, что этот механизм не может функционировать продолжительное время, поскольку при этом необходимо колебать большую массу кожи. Наряду с этим, допускается, что одновременное сокращение кожной мышцы способно обеспечивать определенную настройку упругодемпфирующих свойств кожи, отвечающую степени развития возмущений в обтекающем потоке, вследствие чего получается резонансное взаимодействие волн возмущения в обтекающем потоке с кожей дельфина, причем при некотором соотношении фазовых скоростей волн возмущения в потоке и вызванных ими волн, продвигающихся в коже, может быть достигнуто существенное повышение устойчивости пограничного слоя. Мысль о том, что с помощью кожной мускулатуры дельфин способен изменять упругие свойства кожи, влияющие на стабилизацию пограничного слоя, высказывается и в работе В. В. Бабенко и др. (1969).

Как видно из изложенного, перечисленные точки зрения имеют одну существенную общую черту: все они предполагают, что в процессе образования кожных волн деформации важное значение имеет деятельность мускулатуры — туловищной, подкожной или кожной.

Механизм образования подвижных кожных волн за счет активной работы туловищной или кожной мускулатуры при активном контроле со стороны нервной системы (Соколов, 1962; Sokolov et al., 1969; Бабенко, Суркина, 1969 и др.) в действительности, судя по всему, не имеет места, поскольку из всех мыслимых вариантов он является энергетически наименее выгодным, так как требует значительных и постоянных энергетических затрат. Энергетическая невыгодность этого предполагаемого механизма уже отмечалась ранее (Бабенко, Суркина, 1969). Возможность тотального одновременного сокращения кожной мышцы для изменения общих упруго-демпфирующих свойств кожи на латеральных поверхностях тела (Бабенко, Суркина, 1969; Бабенко и др., 1969) представляется несколько более вероятной, однако основанный на этом прин-

ципе механизм создания подвижных волн деформации в коже явно не может быть главным по причине своей энергетической невыгодности: он предполагает постоянную или почти постоянную работу кожной мышцы. Не исключено, конечно, что при каких-то экстремальных и потому сравнительно редких режимах ускорения одновременные сокращения кожной мышцы могут в известной мере целесообразно изменять общие упругодемпфирующие свойства кожи в соответствии с изменениями параметров обтекающего потока.

Очевидно, что для более определенных суждений по рассматриваемому вопросу крайне желательна экспериментальная проверка высказанных предположений. Однако прямой эксперимент, направленный на выяснение роли кожных мышц в создании подвижных волн деформации в коже дельфина, если и возможен в принципе, то практически чрезвычайно сложен. Сложности в данном случае столь велики, что перерастают, судя по всему, в трудно преодолимое фундаментальное препятствие, заставляя обратиться к поискам каких-то обходных путей получения экспериментального материала. Одним из таких обходных путей может, в частности, стать косвенный эксперимент, доказывающий возможность создания подвижных волн деформации в коже тех или иных представителей *Mammalia* исключительно за счет действия возмущений внешнего обтекающего потока, заведомо без участия каких-либо мышц. Объект подобного косвенного эксперимента по своим функционально-морфологическим характеристикам должен удовлетворять следующим условиям: 1) размеры тела сопоставимы с размерами тела дельфина; 2) число Рейнольдса в пределах от 10^6 до 10^7 ; 3) общие контуры тела плавные; 4) поверхность кожи голая, т. е. волосистой покров незначительный или отсутствует; 5) имеется подкожный жировой слой толщиной в несколько сантиметров, под которым залегают локомоторные мышцы.

Среди потенциально возможных объектов такого эксперимента указанным условиям в наибольшей мере отвечает человек, а точнее — женщины в возрасте примерно от 17 до 28 лет. По величине тела женщины аналогичны дельфинам средней величины, типа *Delphinus*; при плавании с вытянутыми вперед руками со скоростью 2,5—3,5 м/сек число Рейнольдса для женщин ростом около 160—170 см составляет примерно $5,0 \cdot 10^6$ — $7,0 \cdot 10^6$. В типичном случае общие контуры тела женщины плавные, что, как известно (Гицеску, 1966 и др.), объясняется особенностями развития костно-мышечного аппарата и наличием сравнительно толстого подкожного жирового слоя, толщина которого на большей части поверхности тела составляет обычно от 1 до 5 см; под слоем жировой клетчатки залегают локомоторные мышцы. Поверхность тела женщин в связи с рассматриваемой проблемой в типичном случае с достаточным приближением может считаться безволосой, поскольку покрывающий ее незначительный пушок явно не может иметь какого-либо гидродинамического значения и, во всяком случае, не имеет никакого отношения к деформации поверхности тела при плавании. Ко всему этому следует добавить, что в пределах торса и конечностей у человека нет мышц, которые могли бы двигать кожей; расположенная на шее подкожная *m. platysma* кончается уже на уровне второго ребра. В этом смысле человек является в данном случае особенно ценным объектом, поскольку волнообразные складки кожи на торсе и конечностях не могут возникать у него за счет сокращения каких-либо мышц.

МЕТОДИКА

Для выяснения возможности возникновения подвижных волнообразных складок исключительно за счет действия внешних гидродинамических сил автором был проведен эксперимент с женщинами — профессиональными пловчихами. Испытуемые — спортсменки-разрядницы и

мастера спорта — в количестве 10 человек имели возраст от 17 до 28 лет и рост от 154 до 168 см. Исследование толщины подкожного жирового слоя, выполненное автором по существующей методике (Гримм, 1967), с помощью замеров толщины кожной складки штанген-циркулем, показало, что у всех 10 испытуемых толщина его на торсе и бедрах колеблется в пределах от 1 до 4 см. Волосной покров на торсе и бедрах у всех испытуемых был слабым, схема жировотложения и общий тип телосложения во всех случаях были близки к норме.

Во время эксперимента испытуемые без всякой одежды на теле плавали с вытянутыми вперед руками стилями «кроль» и «дельфин» в полностью погруженном состоянии, на глубине около 0,5—1,0 м от поверхности воды при общей глубине бассейна около 2 м, а также выполняли резкие отталкивания ногами от стенки бассейна. На протяжении всего эксперимента проводилась непрерывная подводная кино- и фотосъемка. При плавании стилями «кроль» и «дельфин» скорость движения испытуемых составляла около 2,0—2,8 м/сек, а при отталкивании от стенки бассейна — на короткое время увеличивалась до 3,0—3,5 м/сек.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Изучение полученного в эксперименте кино- и фотоинформационного материала позволило с несомненностью установить, что как при плавании, так и при отталкивании от стенки бассейна при движении в полностью погруженном состоянии со скоростью более 2,0 м/сек у всех 10 испытуемых во всех случаях имело место возникновение хорошо заметных, сравнительно крупных волнообразных складок кожи на торсе и бедрах, расположенных в целом перпендикулярно направлению движения испытуемой (рис. 2). Как видно из рис. 2, волнообразные складки кожи на поверхности тела пловчих не имеют отношения к рельефу, образуемому мышцами, и существуют наряду с ним и независимо от него. Проведенная нами киносъемка тех же испытуемых в воздухе при выполнении ими плавательных движений стилями «кроль» и «дельфин» (в висе), а также при отталкивании ногами от стенки — при подскоках из положения «на корточках» с поднятыми вверх руками вполне объективно доказывает, что в этом случае, как и следовало ожидать, никаких кожных волн деформации не возникает. Таким образом, возникновение этих волн деформации при плавании не может быть объяснено напряжением каких-либо мышц.

При медленном плавании, когда скорость движения не превышает 1,5—1,9 м/сек, волнообразные кожные складки не образуются: они возникают лишь при увеличении скорости движения до 2,0 м/сек и выше и вновь исчезают при уменьшении ее ниже указанного предела, т. е. наблюдается совершенно то же положение, что и у дельфина — возникновение складок в моменты ускорений.

Основными местами возникновения волн деформации кожи у испытуемых были: 1) вентральные и латеральные поверхности торса каудальнее молочных желез, 2) дорсальные поверхности торса каудальнее талии и 3) все поверхности бедер. Исследование распределения динамического давления на поверхности деревянной модели испытуемой № 2, выполненное автором в биогидродинамическом канале отдела нектона Института биологии южных морей АН Украинской ССР, показало, что все указанные участки находятся сзади линии M — минимума динамического давления, т. е. лежат в пределах диффузорного участка (рис. 3). Область возникновения кожных волн деформации у дельфинов также соответствует, как показывают проведенные нами исследования, области положительных градиентов давления. Таким образом, и в этом отношении условия образования волн деформации на поверхности тела у дельфинов и у женщин оказываются идентичными (рис. 3).

Хорошо выраженное движение кожных волн у испытуемых наблюдалось не всегда. В ряде случаев имели место почти неподвижные волны деформации, лишь незначительно смещающиеся по продольной оси тела, что более характерно для таких участков, где толщина подкожного жирового слоя в этом направлении более или менее резко изменяется. На других участках, где толщина слоя подкожной жировой клетчатки в направлении продольной оси тела более равномерна, кожные волны де-

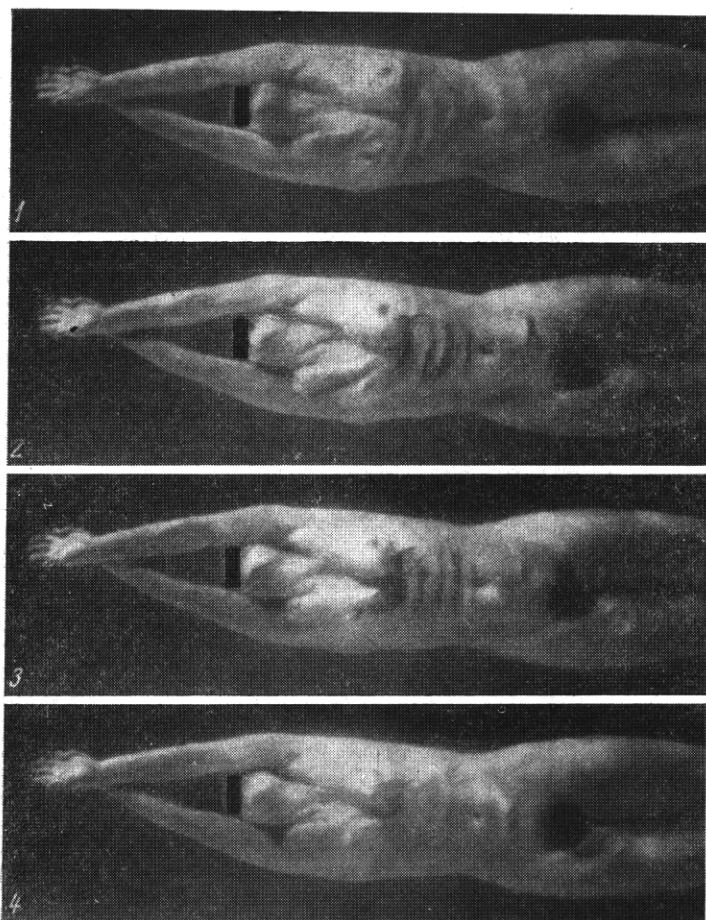


Рис. 2. Подвижные волнообразные кожные складки, появившиеся у пловчихи (испытуемая № 2) на пространстве от молочных желез до талии в момент рывка, при плавании стилем «дельфин»

Последовательные кадры киносъемки. Прочие пояснения в тексте. Киносъемка выполнена киносъемочной группой объединения «Океания» АН УССР, оператор Б. В. Семенов.

формации более подвижны и продольные смещения их более значительны. Один из таких случаев показан на рис. 2, где на четырех последовательных кинокадрах хорошо видно возникновение (кадр 1), продвижение (кадры 2—3) и последующее разрушение (кадр 4) трех поперечных кожных волн у испытуемой № 2 на вентральной поверхности торса, на пространстве от молочных желез до талии. В этом случае скорость движения испытуемой составляет около 2,0 м/сек, скорость же продвижения волн деформации в коже, определенная нами по кинокадрам, — около 1,8 м/сек. Таким образом, скорость продвижения волн деформации в коже испытуемых сопоставима со скоростью их плавания, что вполне

отвечает способу возникновения этих волн исключительно за счет действия обтекающего потока. На рис. 2 видны также поперечные складки на вентральной стороне торса каудальнее талии (кадры 2—4) и на передней поверхности правого бедра (кадр 3).

По внешнему виду и относительным размерам кожные волны деформации у дельфинов и женщин аналогичны, в чем легко убедиться, сопоставляя рисунки 1 и 2. Необходимо отметить и некоторые общие особенности в строении кожи дельфина и человека, вообще характерные для Mammalia, в частности, наличие сосочкового слоя дермы, сплетений коллагеновых волокон в дерме, а также (что свойственно только человеку, Cetacea и немногим другим группам Mammalia, в той или иной мере приспособленным к жизни в воде) слабое развитие или полное отсутствие волосяного покрова.

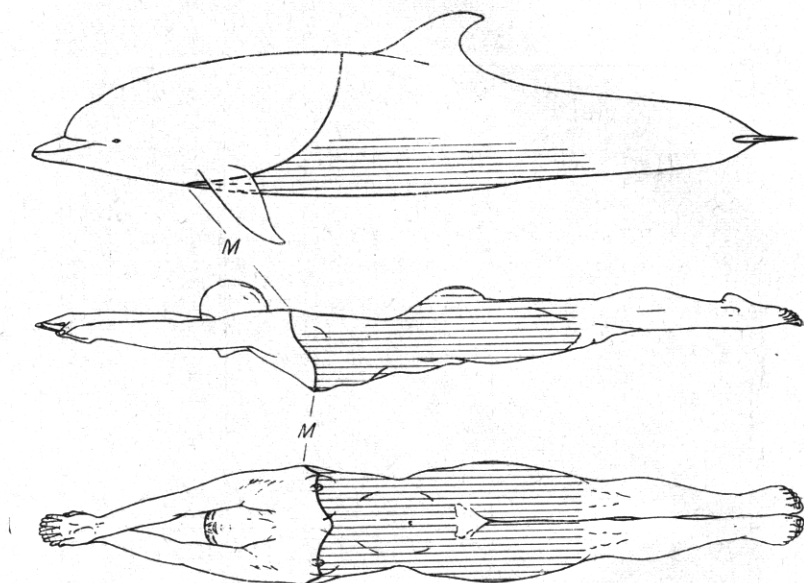


Рис. 3. Линии минимума динамического давления (М) на теле дельфина *Tursiops truncatus* (Montagu) и женщины по результатам модельных испытаний

Штриховкой обозначены области возникновения волн деформации на поверхности тела под действием гидродинамических сил

Наиболее вероятно, что эффект деформации поверхности тела под действием гидродинамических сил будет иметь место не у каждой женщины, а лишь у тех возрастных групп и у тех индивидуумов, у которых морфологические и биохимические характеристики кожных покровов, т. е. характер и интенсивность жировоголожения, толщина, упругость и эластичность кожи и т. п. будут случайны именно такими, при которых возможна пассивная деформация кожных покровов в ответ на определенные возмущения в пограничном слое. Вместе с тем следует подчеркнуть, что этот эффект является вполне обычным, на что указывает, хотя бы, наличие его у всех 10 исследованных нами испытуемых.

Очевидно, что установленная аналогия между дельфином и женщиной случайна. В организации *Homo sapiens* L. не может быть никаких адаптаций, связанных с приспособлением к плаванию; нет оснований говорить о каких-либо специальных особенностях иннервации, специальных мышцах или каких-либо специальных особенностях строения кожи, направленных на обеспечение какого-либо адаптивного ответа кожного покрова на действие гидродинамических сил. А ответ между тем существ-

вует и представляет собой в принципе совершенно такую же деформацию поверхности тела с образованием подвижных волн, расположенных перпендикулярно направлению движения, какую мы видим у дельфина (рис. 1 и 2).

Это, по мнению автора, позволяет предположить, что крупные передвигающиеся волнообразные складки, возникающие в моменты ускорений в коже дельфина, образуются так же, как и мелкие, пассивным путем, т. е. возникновение их не зависит от деятельности каких-либо мышц и не связано непосредственно с деятельностью кожных рецепторов органов чувств, а происходит лишь в результате возникновения определенного соотношения градиентов гидродинамического давления в обтекающем потоке и упруго-эластичных свойств кожи, которые могут быть специально приспособлены к созданию в коже подвижных волн деформации при данных параметрах обтекающего потока. Такой механизм создания подвижных волн деформации энергетически наиболее экономичен, поскольку не требует никакой мышечной деятельности и наиболее прост, поскольку непосредственно не связан с деятельностью нервной системы. Именно такого типа приспособления мы чаще всего встречаем у нектеров: максимально выгодные энергетически и максимально простые по функционально-морфологической структуре. В этом проявляется, в частности, аналогия механизмов, управляющих пограничным слоем у дельфинов и рыб: как кожный покров дельфина, так и ламинаризатор из ктеноидов на чешуе рыб (Бурдак, 1968) выполняют свою функцию без какого-либо активного участия со стороны животного.

Следует также подчеркнуть, что возникновение подвижных волн деформации в коже происходит у дельфина далеко не при всяком ускорении, о чем с несомненностью свидетельствуют накопленные к настоящему времени многочисленные материалы подводных кино съемок, а лишь в некоторых случаях; один из таких случаев мы видим на кинокадрах Эсапьяна (1955). Это может указывать на то, что на данном этапе филогенеза рассматриваемый эффект, возможно, не имеет большого адаптивного значения, представляя собой в известной мере побочное явление, хотя несомненно, что в филогенетическом плане мы имеем дело с прогрессивно развивающимся приспособлением, бесспорно связанным с нектонным образом жизни и направленным на снижение гидродинамического сопротивления.

Кожа Cetacea богата иннервирована (Palmer, Weddel, 1964 и др.) и очень реактивна по отношению к различным тактильным воздействиям. Это, однако, связано, надо полагать, не только и, может быть, не столько с гидродинамической функцией кожи (Соколов, 1962), сколько с ее функцией как органа чувств (Palmer, Weddel, 1964), что имеет очень важное значение в различных аспектах внутривидовых отношений. Несомненно также, что характерная для Cetacea четкая взаимосвязанность дыхательного ритма и попадания определенных участков тела животного в воздушную среду (Томилин, 1967) бесспорно требует очень сложной иннервации кожи, что мы и видим у Cetacea.

ЛИТЕРАТУРА

- Алеев Ю. Г., 1963. Функциональные основы внешнего строения рыбы: 1—247, Изд-во АН СССР, М.
Бабенко В. В., Гнитецкий Н. А., Козлов Л. Ф., 1969. Предварительные результаты исследований упругих свойств кожи живых дельфинов, В кн. «Бионика», 3: 12—19, Изд-во «Наукова Думка», Киев.
Бабенко В. В., Суркина Р. М., 1969. Некоторые гидродинамические особенности плавания дельфинов, Там же: 19—26.
Бурдак В. Д., 1968. О функциональном значении ктеноидов на чешуе рыб, Зоол. ж., 47, 5: 732—738.

- Гицеску Г., 1966. Пластическая анатомия, 3: 1—198, Изд-во «Меридиане», Бухарест.
- Гримм Г., 1967. Основы конституциональной биологии и антропометрии: 1—290, Пер. с немецкого, Изд-во «Медицина», М.
- Кудряшов А. Ф. и Барсуков В. В., 1967. О гидродинамической роли чешуйного покрова рыб как аналога поверхностей, непосредственно сформированных вихревым потоком. Сообщ. 1. Сходство неровностей чешуйного покрова с неровностями на поверхностях, сформированных потоком в руслах рек, Зоол. ж., 46, 3: 393—403.—1967а. О гидродинамической роли чешуйного покрова рыб как аналога поверхностей, непосредственно сформированных вихревым потоком. Сообщ. 2. Гидродинамическая функция чешуйного покрова, Зоол. ж., 46, 4: 556—566.
- Соколов В. Е., 1962. Структура кожного покрова некоторых китообразных. Сообщ. 2, Научн. докл. высш. школы, Биол. науки, 3: 45—55.
- Томилин А. Г., 1957. Китообразные. Звери СССР и прилежащих стран, 9: 1—756, Изд-во АН СССР, М.—1962. О приспособлениях китообразных к быстрому плаванию и о возможности использования этих адаптаций в судостроении, Бюлл. Моск. о-ва испыт. природы, Отд. биол., 67, 5: 10—18.
- Essarian F. S., 1955. Speed-induced skin folds in the bottle-nosed porpoise, *Tursiops truncatus*, *Breviora Mus. Comp. Zool.*, 43: 1—4.
- Palmer E., Weddel G., 1964. The relationship between structure, innervation and function of the skin of the bottle nose dolphin (*Tursiops truncatus*), *Proc. Zool. Soc. London*, 143, 4: 553—568.
- Sokolov V., Bulina I., Rodionov V., 1969. Interaction of dolphin epidermis with flow layer, *Nature (London)*, 222, 5190: 267—268.

MOBILE ROUGHNESS ON THE SURFACE OF THE NECTERS' BODY AS A METHOD OF DECREASING THE HYDRODYNAMIC RESISTANCE

Yu. G. ALEEV

*Institute of Biology of South Seas, Academy of Sciences
of the Ukrainian SSR (Sebastopol)*

Summary

When experimentally studying the pattern of movement of the dolphin and human body in water by means of underwater filming, a possibility has been shown of the passive formation of mobile roughness in the mammal body exclusively at the expense of the effect of external hydrodynamical forces. It is noted that this roughness—running deformation waves in the skin—promotes to a decrease of hydrodynamical resistance.
