

АКАДЕМИЯ НАУК СССР

ЗООЛОГИЧЕСКИЙ  
ЖУРНАЛ

Том LI

(ОТДЕЛЬНЫЙ ОТТИСК)

10

---

МОСКВА · 1973

**ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ВОЛОСЯНОГО  
ПОКРОВА БАЙКАЛЬСКОГО ТЮЛЕНЯ (*PHOCA SIBIRICA*)**

*Е. В. РОМАНЕНКО, В. Е. СОКОЛОВ и Н. М. КАЛИНИЧЕНКО*

*Институт эволюционной морфологии и экологии животных Академии наук СССР  
(Москва)*

Экспериментально изучена структура пограничного слоя на полумоде-  
ли, оклеенной шкурой байкальского тюленя, и на чистой полумодели (без  
шкуры). Измерены уровни пульсации скорости и давления в пограничном  
слое, а также коэффициент сопротивления. Установлено, что волосяной  
покров способствует увеличению толщины пограничного слоя, уменьшению  
уровня пульсации скорости в диапазоне частот 1—10 кгц и уменьшению со-  
противления при скорости обтекания до 8—10 м/сек.

В последние годы уделяется большое внимание исследованию харак-  
тера плавания дельфинов и рыб. Гидродинамика водных животных, име-  
ющих волосяной покров, до настоящего времени остается почти не изу-  
ченной. Между тем условия их жизни таковы, что им не в меньшей сте-  
пени, чем дельфинам и рыбам, нужны высокие скорости, экономия затрат  
энергии на плавание и бесшумность движения под водой. Именно эти  
соображения приводят к выводу о целесообразности и необходимости  
изучения их гидродинамики.

В настоящей работе приводятся результаты экспериментального изу-  
чения структуры пограничного слоя и коэффициента сопротивления жест-  
кой полумодели тела вращения с цилиндрической вставкой (модель,  
разрезанная вдоль по образующей), оклеенной шкурой байкальского  
тюленя. Шкура предварительно находилась несколько месяцев в кон-  
сервированном состоянии (в присоленном виде).

Волосы байкальского тюленя разделяются на остевые, промежуточ-  
ные и пуховые. Наибольшие по размерам остевые волосы (длина 12 мм,  
ширина 234 мк) имеют уплощенную ланцетовидную форму. Своей ши-  
рокой стороной они направлены навстречу потоку воды. Остевые волосы  
не имеют сердцевины, вследствие чего их механические свойства (проч-  
ность, упругость) весьма высоки. Промежуточные волосы также упло-  
щенные, в длину достигают 9,4 мм, в ширину 199 мк. Длина (округлых  
в поперечнике) извитых пуховых волос 6 мм и толщина 29 мк.

Остевые волосы, возвышаясь над промежуточными и пуховыми во-  
лосами своими верхними отделами, которые при плавании отгибаются  
назад и прикрывают промежуточные и пуховые волосы, создают наруж-  
ный слой волосяного покрова. На 1 см<sup>2</sup> поверхности кожи насчитывается  
2800—3300 волос. Это число недостаточно для сохранения воздушной  
прослойки в шерсти байкальского тюленя при плавании, и вода прони-  
кает сквозь его шерсть до эпидермиса.

Для изучения влияния волосяного покрова на характер обтекания  
шкуры последнюю наклеивали на поверхность жесткого полутела диа-  
метром 90 мм и длиной 800 мм и проводили измерения уровня пульсаций  
скорости и давления в различных точках пограничного слоя на шкуре и  
за его пределами на расстоянии 50 см от носика полумодели. Кроме того,

измеряли коэффициент сопротивления. Результаты измерений сравнивали с данными, полученными на чистой (без шкуры) полумодели при тех же условиях эксперимента.

На рис. 1 показана полумодель, оклеенная шкурой тюленя (1), с установленными 8 приемниками пульсаций скорости (2), смонтированными в 1 обойме (3), имеющей форму крылового профиля. Обращает на себя внимание наличие на смоченной шкуре рельефа в виде продольных бороздок, образованных волосяным покровом. При высыхании шкуры бороздки исчезают, и волосяной покров кажется однородным.

Технология приклеивания шкуры к поверхности полумодели следующая. Прежде всего на поверхность полумодели, изготовленной из дюра-



Рис. 1. Полумодель, оклеенная шкурой байкальского тюленя  
1 — полумодель, 2 — приемники пульсаций скорости, 3 — обойма

ля, наклеивают с помощью клея 88 один слой тонкой резины. Толщина резины 1 мм. Приклеивание резины к металлу полумодели производится по всей поверхности. Затем на резину наклеивают шкуру также по всей поверхности с помощью клея «Циакрип». Шкуру выкраивают таким образом, чтобы волос был ориентирован по потоку. Пульсации скорости и давления измеряли с помощью специально сконструированных приемников (Романенко, 1971). Размер чувствительного элемента приемника пульсаций скорости не превышает 0,5 мм, а приемника пульсаций давления — 1,5 мм. Разработанные приемники пульсаций скорости и давления сконструированы таким образом, чтобы измерять пульсации не на обтекаемой поверхности, а в толще пограничного слоя. С этой целью чувствительные элементы их расположены на концах держателей, обращенных навстречу набегающему потоку (рис. 1). Такая конструкция приемников позволяет измерять пульсации в нескольких точках одновременно. В частности, пульсации скорости в описываемом эксперименте измеряли в 8 точках по толщине пограничного слоя, а пульсации давления — в 5. Пульсации скорости и давления измеряли попеременно. Вначале измеряли пульсации скорости, затем вместо обоймы с приемниками пульсаций скорости в том же месте полумодели крепили обойму с приемниками пульсаций давления и вновь проводили измерения.

Приемники пульсаций скорости располагали в следующих точках по толщине пограничного слоя: 1-й приемник — на расстоянии 1,5 мм от поверхности полумодели (при отсутствии на ней шкуры) или от поверхности шкуры. 2-й приемник — на расстоянии 4,5, 3-й — 7,5, 4-й — 10,5, 5-й — 13,5, 6-й — 16,5, 7-й — 28,5, 8-й — 37,5 мм.

Приемники пульсаций давления располагали в следующем порядке: 1-й — на расстоянии 2,5 мм от поверхности, 2-й — 7,5, 3-й — 12,5, 4-й — 17,5, 5-й — 37,5 мм.

Полумодель с закрепленными на ней приемниками пульсаций устанавливали в рабочем участке гидродинамической трубы. Измерения проводили при значениях скорости набегающего потока от 5 до 25 м/сек. Значения статического давления в трубе были таковы, что обеспечивали бескавитационное обтекание полумодели.

Полезную информацию с приемников пульсаций передавали по экранированным проводам к регистрирующей аппаратуре.

Одновременно с измерениями пульсаций скорости и давления проводили силовые измерения. Силу сопротивления измеряли на механических автоматических весах типа ЗКВ-20. Перед началом и после эксперимента весы были тарированы. Погрешность тарировки равна 0,07 кг.

Измеренный коэффициент сопротивления вычисляли по формуле

$$Cx_{изм} = \frac{x - x_{ст}}{q \cdot S}, \quad (1)$$

где  $x$  — сила сопротивления полумодели и стола, на котором полумодель закреплена,  $x_{ст}$  — сопротивление стола в присутствии полумодели, которое определяли в специальном эксперименте,  $S$  — площадь миделя полумодели  $q = \frac{\rho \cdot v^2}{2}$  — скоростной напор.

Так как значения гидродинамических сил, действующих на одно и то же тело в потоке, ограниченном стенками трубы, и в безграничном потоке, отличаются вследствие загромождения потока полумоделью, наличия спутной струи, продольного градиента давления и пограничного слоя на стенках трубы, вводили поправки по известной методике. Коэффициент сопротивления, пересчитанный к случаю обтекания полумодели безграничным потоком, вычисляли по формуле

$$Cx = \frac{Cx_{изм} \cdot S}{(1 + 2e_{vn} + 2E_{vm}) [S - d(\delta^{**} - \Delta h)]} - \delta_{Cx}, \quad (2)$$

где  $E_{vn}$  — поправка на наличие пограничного слоя на стенках трубы,  $E_{vm}$  — поправка на загромождение полумоделью рабочей части трубы,  $\delta^{**}$  — толщина потери импульса пограничного слоя,  $d$  — диаметр полумодели,  $\Delta h$  — толщина зазора между полумоделью и рабочей частью,  $\delta_{Cx}$  — поправка на продольный градиент давления.

Подстановка соответствующих значений в соотношение (2) приводит к виду

$$Cx = 0,924 \cdot Cx_{изм} - \delta_{Cx}. \quad (3)$$

Измерения проводили при нулевом угле атаки полумодели.

Результаты измерения пульсаций скорости и давления, а также коэффициента сопротивления позволяют сделать следующие выводы:

1. Толщина пограничного слоя на шкуре в точке измерения больше, чем на чистой полумодели в той же точке, почти в 2 раза. Это иллюстрирует рис. 2, а, б, в, где приведены осциллограммы пульсаций давления на расстояниях соответственно 2,5, 7,5, и 12,5 мм от поверхности шкуры. На рис. 2, г, д, е для сравнения приведены осциллограммы пульсаций давления в тех же точках пограничного слоя на чистой полумодели. Легко заметить, что на чистой полумодели перемежаемость наблюдается на расстоянии 7,5 мм от поверхности, тогда как на шкуре подобная картина течения наблюдается лишь на расстоянии 12,5 мм.

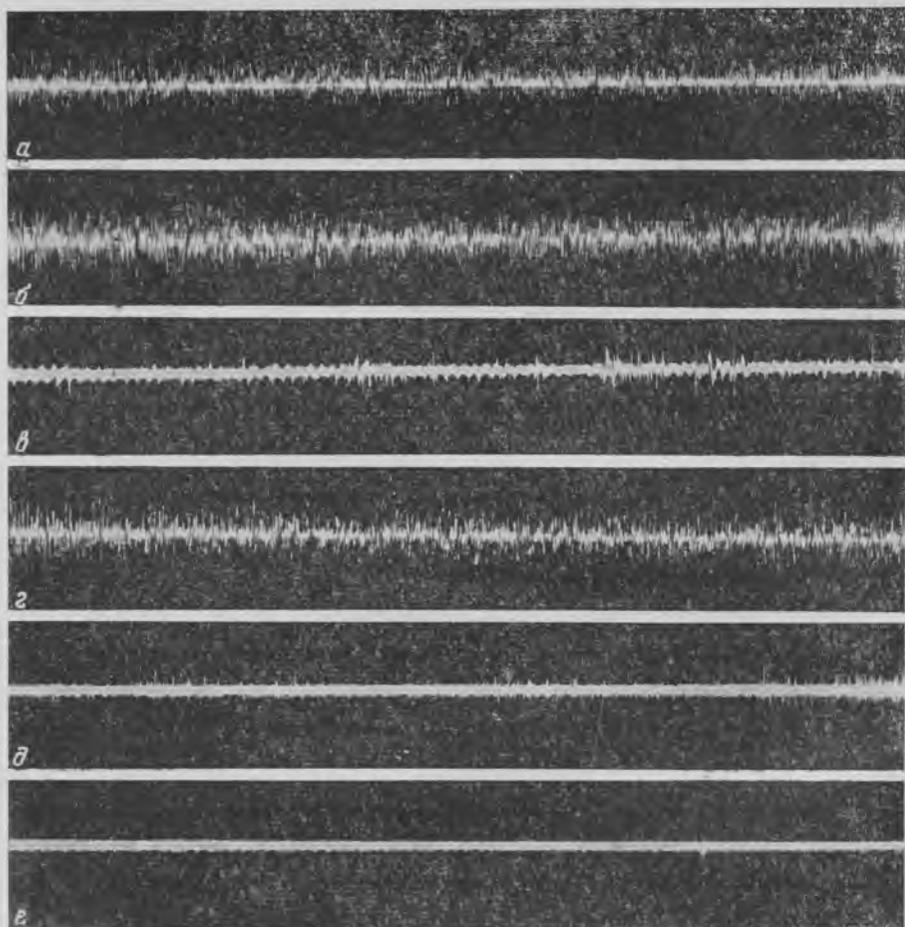


Рис. 2. Осциллограммы пульсаций давления

На расстояниях: а — 2,5 мм, б — 7,5 мм, в — 12,5 мм от поверхности кожи; на расстояниях: г — 2,5 мм, д — 6,5 мм, е — 12,5 мм от поверхности чистой полумодели

Увеличение толщины пограничного слоя на коже можно объяснить возмущающим действием волосяного покрова на носике полумодели, подобно тому, как это происходит при наличии на носике шероховатости или турбулизатора.

2. Спектр пульсаций скорости на коже отличается от соответствующего спектра на чистой полумодели. Отличие состоит в том, что в интервале частот до 1—2 кГц уровень пульсаций скорости в пограничном слое на коже выше, чем на чистой полумодели примерно на 6 дБ. В интервале частот от 1—2 кГц до 8—10 кГц наблюдается обратная картина: уровень пульсаций скорости в пограничном слое на коже меньше, чем на чистой полумодели на 6—8 дБ. Это иллюстрирует спектрограмма на рис. 3. Скорость потока в этом случае составляла 10 м/сек. Подобное явление наблюдалось при значениях скорости потока от 5 до 15 м/сек. (При значениях скорости потока менее 5 м/сек измерения не проводились.) При более высоких значениях скорости потока спектры пульсаций скорости практически совпадают.

Уменьшение доли высокочастотных составляющих спектра пульсаций скорости в пограничном слое на коже можно объяснить теми же причинами, которые приводят к уменьшению уровня пульсаций скорости в пограничном слое при наличии полимерных добавок.

Следует отметить, что спектр пульсаций давления в пограничном слое на шкуре практически совпадает с соответствующим спектром на чистой полумодели (рис. 4). Кажущееся противоречие результатов измерения уровней пульсаций скорости и давления в пограничном слое на шкуре и

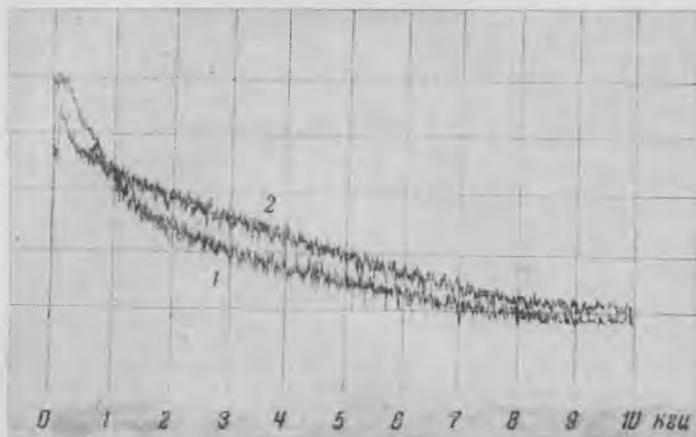


Рис. 3. Спектры пульсаций скорости  
1 — на расстоянии 1,5 мм от поверхности шкуры, 2 — на расстоянии 1,5 мм от поверхности чистой модели

чистой полумодели легко объясняется тем обстоятельством, что пульсации скорости в данной точке имеют локальный характер и не зависят от толщины пограничного слоя, тогда как пульсации давления имеют интегральный характер и зависят от толщины пограничного слоя. То, что спектры пульсаций давления на шкуре и чистой полумодели совпали, по-видимому, случайно. Спектры могут и не совпадать, но они не обязательно должны повторять форму спектров пульсаций скорости.

3. Коэффициент сопротивления чистой полумодели с увеличением скорости уменьшается, а полумодели с наклеенной шкурой — увеличивается. Это иллюстрирует рис. 5. Легко заметить, что коэффициент сопротивления полумодели со шкурой меньше коэффициента сопротивления чистой полумодели при скорости потока до 8—10 м/сек. При более высокой скорости потока соотношение меняется на обратное. Значительное увеличение коэффициента сопротивления полумодели с покрытием на больших скоростях указывает на то, что, по-видимому, изменяется характер обтекания. Для изучения этого явления необходимы более детальные исследования структуры пограничного слоя.

Максимальная скорость плавания обыкновенного тюленя (в том числе, по-видимому, и байкальского) составляет 3—5 м/сек (Магга В. Рюпиц, 1969). Коэффициент сопротивления волосяного покрова байкальско-

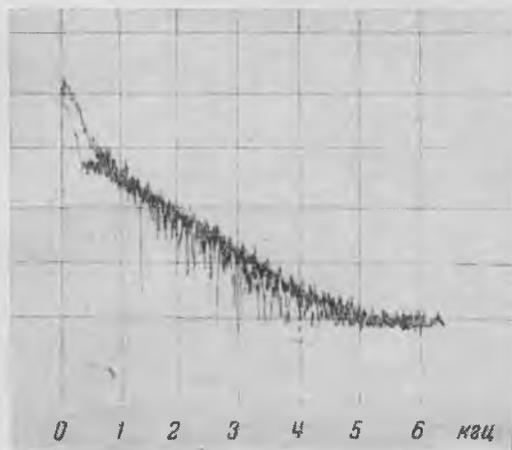


Рис. 4. Спектры пульсаций давления на расстоянии 2,5 мм от поверхности шкуры и чистой полумодели

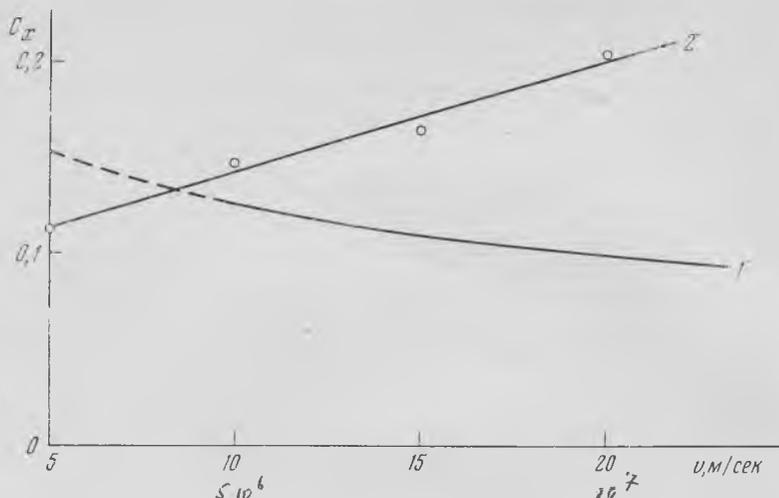


Рис. 5. Коэффициент сопротивления чистой полумодели (1) и полумодели с наклеенной шкурой (2)

го тюленя оказывается меньше коэффициента сопротивления гладкой поверхности именно при скоростях, меньших 8—10 м/сек. Следовательно, при таких скоростных режимах плавания, какие имеет байкальский тюлень, наличие волосяного покрова оказывается более эффективным, чем безволосая, гладкая поверхность кожи.

#### ЛИТЕРАТУРА

- Романенко Е. В., 1971. Приемники пульсаций давления, предназначенные для работы с дельфинами, Тр. Акуст. ин-та, 17: 132—140.  
 Марта В. Р., 1969. *Phoca vitulina* fiziologiniu savybiu tyрмаi baseino salygomis, Liet. vet. akad. darbai, 9: 105—118.

#### HYDRODYNAMIC PATTERNS OF HAIR COVER IN *PHOCA SIBIRICA*

E. V. ROMANENKO, V. E. SOKOLOV and N. M. KALINICHENKO

*Institute of Evolutionary Morphology and Ecology of Animals, USSR Academy of Sciences (Moscow)*

#### Summary

The structure of boundary layer was experimentally studied both on the semimodel covered with the seal skin and the pure semimodel (without skin). The levels of rate and pressure pulsations, as well as the resistance coefficient were measured in the boundary layer. It was established that the hair cover promotes the increase of the boundary layer in thickness, the decrease of the level of rate pulsations in the range of frequencies from 1 to 10 kHz, and the decrease of resistance at the rate of flowing round from 8 to 10 m/sec.

$$\frac{1000 \cdot 5000}{0,01} = 5 \cdot 10^6$$