

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ ЭКОЛОГИИ И ЭВОЛЮЦИИ им. А.Н. Северцова (ИПЭЭ
РАН)

УДК 577.31 599:591.185.5+591.485

УТВЕРЖДАЮ

Директор ИПЭЭ РАН

академик Д.С. Павлов

«10» декабря 2014 г.

ОТЧЕТ

О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

По Программе фундаментальных исследований Президиума РАН № 23
"Фундаментальные проблемы океанологии: физика, геология, биология,
экология". Проект «Изучение акустики, гидродинамики дельфинов, систем
электроориентации рыб». (годовой)

Руководитель проекта Академик Д.С. Павлов

МОСКВА 2014

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Руководитель проекта, директор института,

академик

Д.С. Павлов

Основные исполнители:

Главный научный сотрудник , д.б.н., проф.

А.Я. Супин

Руководитель группой, д.б.н., гл.н.с. проф.

Е.В. Романенко

Руководитель группой, д.б.н.

В.Д. Барон

РЕФЕРАТ

Отчет 49 с., 1 кн., 9 рис., 11 источников

ДЕЛЬФИН, СЛУХ, ЭЛЕКТРОФИЗИОЛОГИЯ, ГИДРОДИНАМИКА, МОДЕЛИРОВАНИЕ, ЭЛЕКТРОЛОКАЦИЯ, СЛАБОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ РЫБЫ

На китах белухах *Delphinapterus leucas* изучался временный сдвиг порогов (ВСП) после воздействия интенсивного шумового сигнала. Максимальный ВСП (более чем 60 дБ через 1.5 мин после окончания экспозиции шума) и наиболее длительное восстановление нормальной чувствительности (более 1 ч) вызывалось низкочастотными шумами с центральной частотой 11.2 и 22.5 кГц. При центральных частотах шума 45 и 90 кГц эффект подавления чувствительности снижался. Была отмечена существенная разница в степени влияния интенсивного шума между двумя подопытными животными.

Получены расчетные формулы для оценки индуктивного сопротивления жестких, активно деформируемых крыльев при произвольном фазовом сдвиге между линейными и угловыми колебаниями. Полученные формулы могут быть использованы при проектировании плавниковых движителей.

Проведены экспериментальные работы по исследованию траекторий движения электрочувствительных рыб при их ориентации в слабых электрических полях однородного и дипольного типов. Для регистрации положения рыбы в аквариуме использовалась видеокамера, программа обработки изображений, написанная в среде *Matlab* и компьютер. Показано, что в зависимости от параметров предъявляемого электрического поля возможно наблюдать, как скопление траекторий вблизи его источника, так и избегание поля (в случаях более сильных напряженностей).

Написана в среде MATLAB программа, позволившая более детально записывать и анализировать траектории движения электрочувствительных рыб в экспериментальном бассейне.

СОДЕРЖАНИЕ

| | | |
|-------------|---|-----------|
| | ВВЕДЕНИЕ | 6 |
| | ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ | 7 |
| <i>1</i> | <i>Воздействие громкого шума на слуховую систему дельфина</i> | <i>7</i> |
| <i>1.1</i> | <i>Постановка задачи</i> | <i>7</i> |
| <i>1.2.</i> | <i>Методика</i> | <i>8</i> |
| <i>1.3</i> | <i>Результаты</i> | <i>11</i> |
| <i>1.4</i> | <i>Выводы и рекомендации</i> | <i>13</i> |
| <i>2</i> | <i>Индуктивное сопротивление деформируемых крыльев</i> | <i>17</i> |
| <i>2.1</i> | <i>Постановка задачи</i> | <i>17</i> |
| <i>2.2</i> | <i>Расчетные формулы для индуктивного сопротивления деформирующегося крыла</i> | <i>23</i> |
| <i>3</i> | <i>Траектории движения электрочувствительных рыб в слабых электрических полях</i> | <i>35</i> |
| | ЗАКЛЮЧЕНИЕ | 47 |
| | СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ | 49 |

ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

ВСП – временный сдвиг порога.

ПСП – постоянный сдвиг порога.

УЗД – уровень звукового давления.

УЗЭ – уровень звуковой экспозиции.

СВП – слуховые вызванные потенциалы.

РСР – реакция следования ритму.

ИТС-1032 - International Transducer Corporation.

ВВЕДЕНИЕ

В 2014 г. на китах белухах *Delphinapterus leucas* исследована зависимость ВСП после воздействия громкого шума от уровня звуковой экспозиции (УЗЭ – эквивалент суммарной энергии воздействующего шума) при различных соотношениях интенсивность/длительность шума. Показано, что УЗЭ не может быть принят как универсальная мера воздействия шума, поскольку при одном и том же УЗЭ эффект шума существенно зависит от соотношения интенсивность/длительность. Установлены пределы, в которых критерий УЗЭ удовлетворительно характеризует эффект воздействия на слуховую систему. Показано, какие коррекции необходимы для адекватной характеристики звукового воздействия за этими пределами.

Полученные результаты имеют значения для выработки рекомендаций по допустимым пределам шумового загрязнения с точки зрения безопасности для акустической ориентации морских млекопитающих.

Проведены исследования по моделированию хвостовой лопасти дельфинов жестким деформируемым крылом-двигателем. Получены расчетные формулы для оценки индуктивного сопротивления, развиваемого жестким деформируемым крылом, при произвольном фазовом сдвиге между линейными и угловыми колебаниями.

Написана в среде MATLAB программа, позволившая более детально записывать и анализировать траектории движения электрочувствительных рыб в экспериментальном бассейне.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

1 Воздействие громкого шума на слуховую систему дельфина

1.1 Постановка задачи

Воздействие шума на слуховую систему приводит к необратимому или обратимому снижению слуховой чувствительности, известному как постоянный или временный сдвиг слуховых порогов (соответственно, ПСП или ВСП). На ПСП и ВСП, возникающие у китообразных в результате воздействия шума, влияют многие факторы: спектр шума, интенсивность, длительность шумового воздействия, время после шумового воздействия, непрерывный или прерывистый характер шумового воздействия, вид животного, и многое другое. Из всех этих факторов, наиболее очевидно влияние интенсивности и длительности шума: чем выше интенсивность и(или) дольше воздействие шума, тем больше эффект ПСП или ВСП. Поэтому многим исследователям представлялось логичным объединить эти два параметра, чтобы охарактеризовать действие шума исходя из равноэнергетической гипотезы, т.е. характеризовать шум его интегральной энергией (плотностью потока энергии). Этот подход был использован во многих исследованиях ВСП у китообразных. Шумовое воздействие характеризовалось величиной, обозначаемой как уровень звуковой экспозиции (УЗЭ) и рассчитываемой как интеграл по времени от квадрата уровня звукового давления (УЗД). Соответственно, единица измерения УЗЭ – дБ относительно $1 \text{ мкПа}^2\text{с}$. Фактически УЗЭ – эквивалент выраженной в дБ плотности потока энергии ($\text{Дж}/\text{м}^2$), в котором вместо плотности потока мощности ($\text{Вт}/\text{м}^2$) используется квадрат звукового давления (Па^2). УЗЭ широко используется и был рекомендован для характеристики шумового воздействия на морских млекопитающих (Southall et al., 2007).

Однако УЗЭ не может служить универсальной мерой воздействия для любых комбинаций УЗД и времени воздействия шума. В ряде исследований

показано, что зависимость ВСП от УЗД становится более крутой при удлинении времени воздействия шума, и обратно, зависимость ВСП от времени воздействия шума становится более крутой при повышении УЗД. Эти закономерности были объединены моделью согласно которой ВСП пропорционален произведению двух функций: ВСП как функция УЗД и ВСП как функция логарифма длительности воздействия (Finneran et al., 2010). Однако очевидно, что при этом, в зависимости от УЗД и длительности шума, «обмен» интенсивность/длительность (time/intensity trade) может быть либо больше, либо меньше 1 дБ/дБ, вопреки тому, что подразумевается равноэнергетической гипотезой.

Были получены экспериментальные данные, показывающие различную (позитивную или негативную) зависимость ВСП от соотношения УЗД/длительность шума (Nachtigall et al., 2003; Finneran et al., 2007; Popov et al., 2011, 2013; Mooney et al., 2009). Однако эти отдельные наблюдения не дают общей картины зависимости ВСП от отношения УЗД/длительность шума. Для этого требуется более систематическое исследование при различных комбинациях этих двух параметров. Такое исследование было целью данного этапа программы. Исследование было выполнено с применением методики слуховых вызванных потенциалов (СВП). Этим методом измерялись слуховые пороги и их сдвиги (ВСП).

1.2 Методика

Исследование было выполнено на Утришской морской станции Российской академии наук. Объектом исследования была самка кита белухи *Delphinapterus leucas* в возрасте 2 лет. Животное содержали в бассейне размером 9×4×1.2 м, заполненном морской водой. На время измерений животное помещалось на звукопрозрачных носилках в ванне размером 4.5×0.85×0.6 м, заполненной морской водой. Животное поддерживалось на носилках таким

образом, что дорзальная поверхность головы и дыхало оставались над поверхностью воды.

Для неинвазивной регистрации СВП применяли поверхностные электроды, вмонтированные в латексные присоски. Активный электрод располагался на дорзальной поверхности головы, 7 см каудальнее дыхала, референтный электрод – на спине. Электроды соединялись экранированными кабелями со входом усилителя биопотенциалов (усиление 80 дБ, полоса пропускания от 200 до 5000 Гц). Усиленный сигнал оцифровывался и регистрировался с помощью платы сбора данных DAQcard-6062E (National Instruments, США) и сохранялся в памяти стандартного компьютера.

Тестовыми стимулами для измерения порогов были серии тональных посылок. Каждая серия состояла из 16 тональных посылок. Каждая посылка содержала 8 периодов несущей частоты 32 кГц, в косинусоидальной огибающей, таким образом, длительность посылки составляла 0.25 мс. Серии тональных посылок предъявлялись с частотой 16/с. УЗД тестовых стимулов представляли в дБ относительно 1 мкПа среднеквадратичного звукового давления.

Шум имел спектр шириной 1/2 октавы, центрированной на частоте 22.5 кГц. УЗД шума представляли в дБ относительно 1 мкПа среднеквадратичного звукового давления.

Тест-сигналы и шум синтезировали в цифровом виде и воспроизводили с помощью той же платы сбора данных DAQcard-6062E. Аналоговый сигнал проходил через усилитель мощности и аттенюатор и воспроизводился через излучатель ИТС-1032 (International Transducer Corporation, USA). Излучатель располагался на расстоянии 1 м перед головой животного. Для воспроизведения тест-сигналов использовали усилитель-аттенюатор непромышленного изготовления с полосой пропускания 200 кГц. Для усиления шума использовали усилитель мощности CV-1800 amplifier (Cervin Vega, США) с полосой пропускания 65 кГц. Канал воспроизведения тест-сигналов и шума

калибровали до и после измерений, располагая измерительный гидрофон В&К 8103 (Bruel&Kjaer, Дания) вблизи головы животного.

Для регистрации СВП из оцифрованного сигнала биопотенциалов выделялись фрагменты длительностью по 25 мс, синхронные с тест-сигналом. Фрагменты когерентно усреднялись on-line. Для дальнейшего анализа из усредненного сигнала выделяли сегмент длительностью 16 мс (с 5-й по 21-ю мс от начала стимула). Этот сегмент содержал ритмическую последовательность СВП (реакция следования ритму, РСР), возникающую в ответ на ритмическую серию тональных посылок тест-сигнала. Выделенный сегмент on-line подвергался преобразованию Фурье для получения частотного спектра. Величина спектрального пика на частоте 1 кГц (частота следования тональных посылок в тест-сигнале) принималась за величину РСР.

Используя описанную методику регистрации СВП, прослеживали как преэкспозиционную, так и постэкспозиционную (до и после действия шума) динамику слуховых порогов. Применяли адаптивную процедуру отслеживания порогов (метод лестницы). Зарегистрированный фрагмент биопотенциалов рассматривался как содержащий ответ на тест-сигнал (СВП), если спектральный пик на частоте 1 кГц более чем вдвое превышал спектральные компоненты в прилежащем диапазоне частот от 0.75 до 1.25 кГц. Стимул, вызвавший этот ответ, считали надпороговым. В противном случае считали, что ответ отсутствует, и стимул подпороговый. От пробы к пробе, интенсивность стимулов варьировали в зависимости от наличия или отсутствия ответа. Если ответ присутствовал, интенсивность стимула в следующей пробе снижали на 5 дБ. При отсутствии ответа, интенсивность стимула в следующей пробе повышали на 5 дБ. В результате интенсивность стимула варьировала в узкой околопороговой зоне. Выделяли точки реверсии (переход от повышения интенсивности сигнала к понижению и обратно), и средние значения в каждой паре соседних точек реверсии принимали за оценку прога в соответствующий момент времени.

Интенсивность шума варьировали от 155 до 170 дБ относительно 1 мкПа. Длительность шумовой экспозиции варьировали от 19 до 6000 с. Постэкспозиционные пороги прослеживались до полного восстановления, но не дольше 1 ч.

Экспериментальная процедура не приводила к нарушениям поведения животного после прекращения эксперимента и возвращения животного в бассейн.

1.3 Результаты

Тест-сигнал в виде ритмической серии тональных посылок вызывал реакцию следования ритму (РСР) в виде серии ритмических колебаний биопотенциалов той же частоты (1 кГц), что и частота тональных посылок. При варьировании интенсивности тест-сигнала в околопороговой зоне, как правило, повышение или понижение интенсивности на один 5-дБ шаг приводило, соответственно, к появлению или исчезновению ответа. В некоторых случаях переход от надпороговой к подпороговой интенсивности составлял 10 дБ. Фоновый порог, измеренный и оцененный по описанной выше процедуре, составил 52.5 дБ относительно 1 мкПа.

Непосредственно после воздействия шума порог возрастал по сравнению с исходным (фоновым) уровнем. Затем порог постепенно восстанавливался. Функция зависимости порога от постэкспозиционного времени могла быть удовлетворительно (R^2 от 0.91 до 0.98) аппроксимирована логарифмической линией регрессии. Непосредственно постэкспозиционный порог оценивали как значение этой функции регрессии в момент 2 мин после выключения шума. Разницу между постэкспозиционным и преэкспозиционным порогами принимали за сдвиг порога (ВСП).

Были протестированы все комбинации шума с УЗД от 155 до 170 дБ относительно 1 мкПа (с шагом 5 дБ) и длительностью от 19 до 6000 с (с 3.2-

кратным шагом). Исключением была только комбинация максимальной интенсивности (170 дБ) и наибольшей длительности (6000 с) которая не была применена из опасения повреждающего действия на слух животного. Измерения показали монотонное возрастание ВСП как с повышением УЗД при заданной длительности шумовой экспозиции, так и с увеличением длительности экспозиции при заданном УЗД (Рис. 1). Как функции зависимости ВСП от логарифма длительности экспозиции, так и функции зависимости ВСП от УЗД, удовлетворительно аппроксимировались линиями регрессии (R^2 соответственно от 0.80 до 1.0 и от 0.91 до 0.99).

Крутизна функции зависимости ВСП от длительности экспозиции увеличивалась с повышением УЗД (рис. 1А). Аналогично, крутизна функции зависимости ВСП от УЗД увеличивалась с удлинением экспозиции (рис. 1Б). При аппроксимации линиями регрессии, наклон функции зависимости ВСП от длительности возрастал от 3.0 ± 0.2 (стандартная ошибка) дБ на логарифмическую единицу при УЗД 155 дБ до 17.0 ± 1.0 дБ на логарифмическую единицу при УЗД 170 дБ. Соответственно, наклон функции зависимости ВСП от УЗД возрастал от 0.40 ± 0.14 дБ/дБ при длительности экспозиции 19 с до 2.75 ± 1.01 дБ/дБ при длительности экспозиции 6000 с. При всех длительностях шумовой экспозиции, ВСП сводился к нулю при УЗД от 154 до 155 дБ относительно 1 мкПа. Соответственно, при всех УЗД, ВСП сводился к нулю при длительности экспозиции от 6 до 16 с.

Те же данные использованы, чтобы охарактеризовать зависимость ВСП от соотношения УЗД/длительность экспонируемого шума при некотором заданном УЗЭ. На рис. 2 представлена зависимость ВСП от соотношения УЗД/длительность шума при различных УЗЭ. Отношение R УЗД/длительность шума представлено в дБ как разность (в дБ) между УЗД и дБ-мерой длительности:

$$R = L - 10 \log T, \quad (1)$$

где L (level) – УЗД и T – длительность экспозиции. Если УЗД представлен в дБ относительно 1 мкПа и длительность экспозиции в секундах, то R представлен в дБ относительно 1 мкПа²/с.

Такое представление данных наглядно показывает, что при некотором постоянном УЗЭ, ВСП не остается постоянным, а зависит от соотношения УЗД/длительность. Зависимость ВСП от соотношения УЗД/длительность не монотонна. При низких значениях R , зависимость ВСП от R позитивна: чем выше отношение УЗД/длительность, тем выше ВСП при заданном УЗЭ. При высоких значениях R зависимость негативна: чем выше отношение УЗД/длительность, тем ниже ВСП при заданном УЗЭ. Точка перегиба от позитивной к негативной зависимости – при значениях R от 143 дБ (при УЗЭ 188 дБ относительно 1 мкПа²/с) до 148 дБ (при УЗЭ 183 дБ относительно 1 мкПа²/с), т.е. соответствует средним (не максимальным и не минимальным) значениям отношения УЗД/длительность.

Следует отметить, что при наиболее эффективных значениях отношения УЗД/длительность, возможны более высокие значения ВСП при низких значениях УЗЭ, чем при менее эффективных отношениях УЗД/длительность, но более высоких УЗЭ.

1.4 Выводы и рекомендации

С точки зрения фундаментальной физиологии слуховой системы морских млекопитающих, приведенные данные показывают безусловное преимущество мультипликационной модели эффектов воздействия шума по сравнению с равноэнергетической моделью. Результаты аппроксимации этими двумя моделями представлены на рис. 1 и 2 наряду с экспериментальными данными. Равноэнергетическая модель явно значительно хуже соответствует экспериментальным данным (аппроксимирующие прямые линии значительно больше отклоняются от экспериментальных графиков), чем

мультипликационная модель. Для равноэнергетической модели минимальное среднеквадратичное отклонение от экспериментальных данных составило 6.2 дБ, тогда как для мультипликационной модели – 1.8 дБ.

С практической точки зрения, Этот результат важен для расчетов возможных эффектов воздействия громких звуков в широком диапазоне их параметров, когда прямое экспериментальное исследование недоступно.

Приведенные данные показывают, что при оценке влияния шума на слуховую систему морских млекопитающих УЗЭ не может использоваться в качестве универсальной меры эффекта воздействия шума. При выработке допустимых норм воздействия шума безусловно необходимо учитывать соотношение УЗД/длительность экспозиции. Соотношение УЗД/длительность не только количественно, но и качественно влияет на эффект шума при некотором УЗЭ: в зависимости от соотношения УЗД/длительность, более низкий УЗЭ может вызывать более сильный эффект (большой ВСП), чем более высокий УЗЭ.

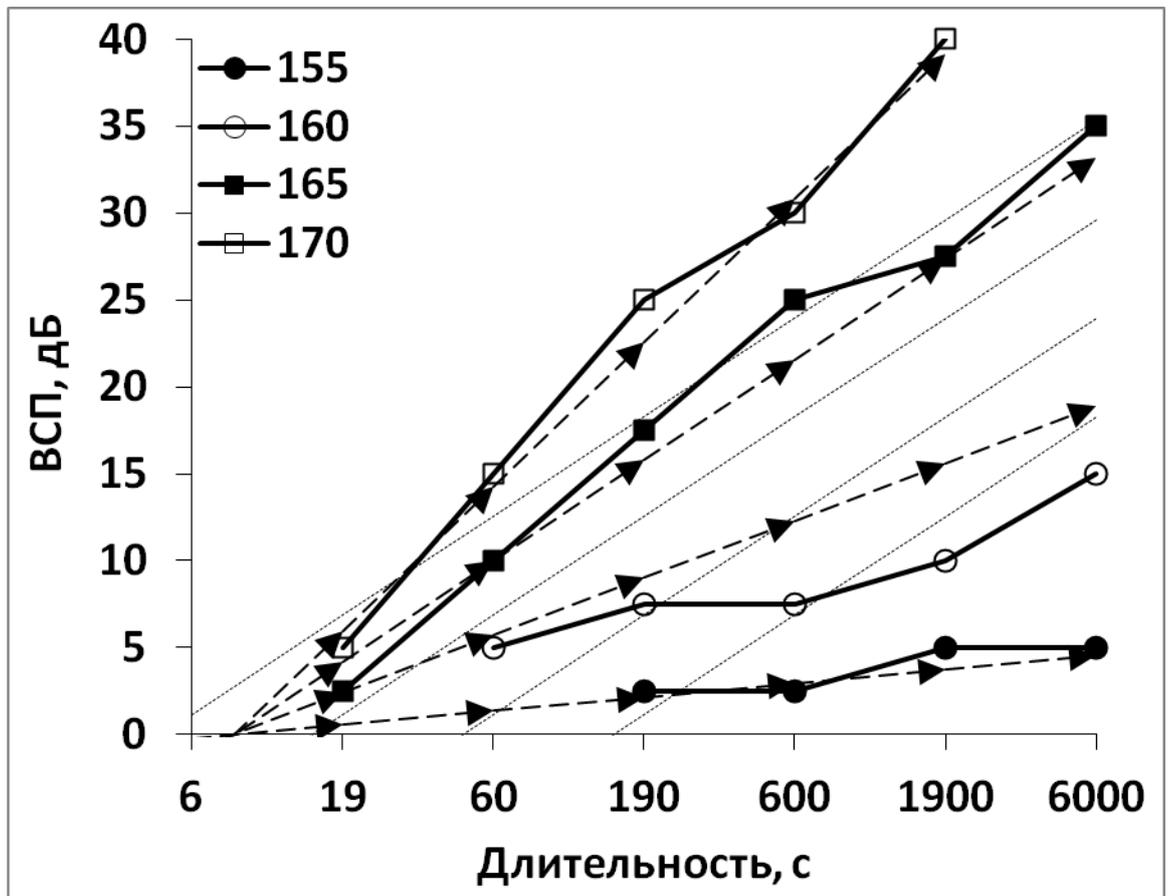


Рис. 1. Зависимость ВСП от длительности шума при различных значениях УЗД шума (указаны в легенде в дБ относительно 1 мкПа). Прямые точечные линии – аппроксимация данных равноэнергетической моделью. Прямые пунктирные линии со стрелками – аппроксимация мультипликативной моделью.

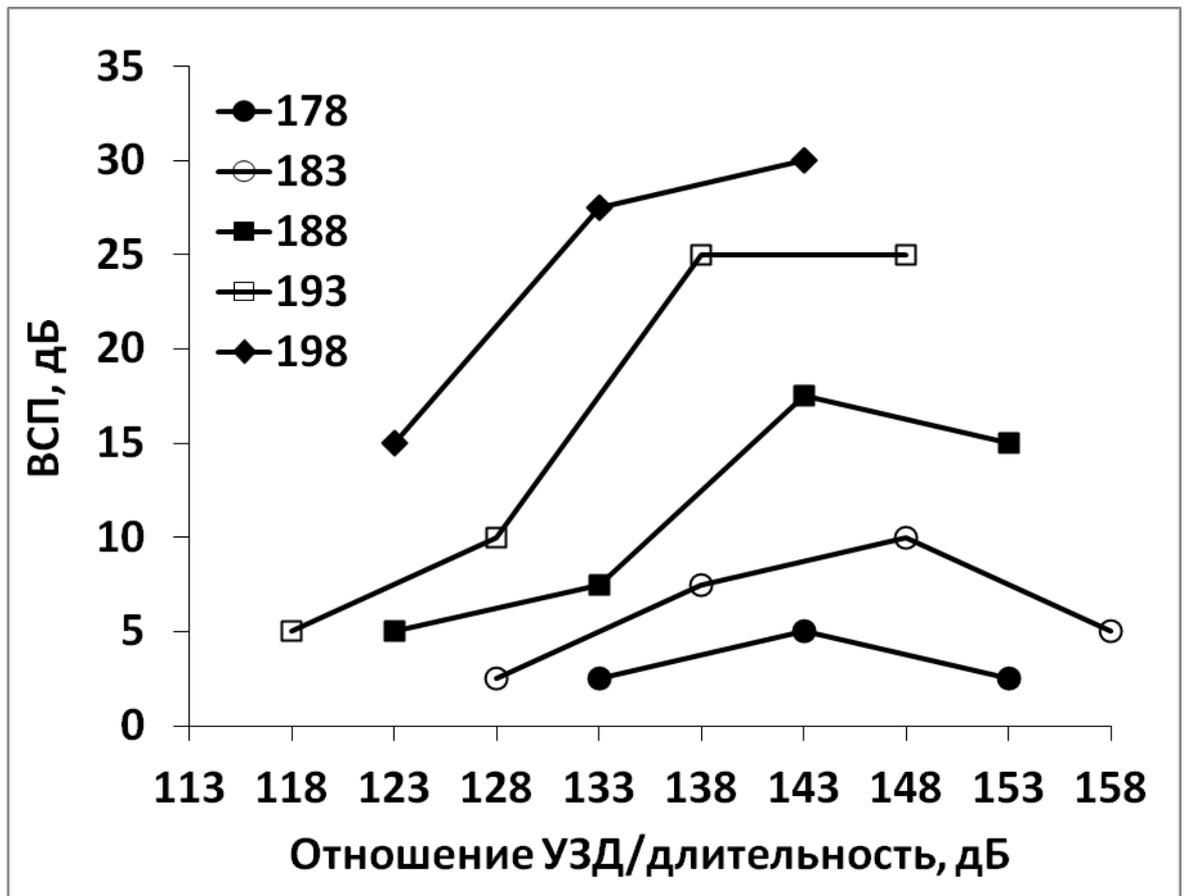


Рис. 2. Зависимость ВСП от отношения УЗД/длительность шума при различных значениях УЗЭ (указаны в легенде в дБ относительно $1 \text{ мкПа}^2/\text{с}$).

2 Индуктивное сопротивление деформируемых крыльев

2.1 Постановка задачи

В 2014 году начаты исследования деформируемых крыльев. Подавляющее большинство теоретических и экспериментальных аэро- гидродинамических исследований посвящено изучению плоских жестких недеформируемых крыльев. Во многих случаях жесткими крыльями моделируются крылья животных: китообразных, рыб, птиц и насекомых. В то же время известно, что в природе животными используются исключительно гибкие крылья. В частности, исследования кинематики и гидродинамики дельфинов (Романенко, 2001; Romanenko, 2002) показали, что в процессе активного плавания хвостовая лопасть дельфина, которая работает как эластичное крыло-двигатель, заметно деформируется (Рис. 3).

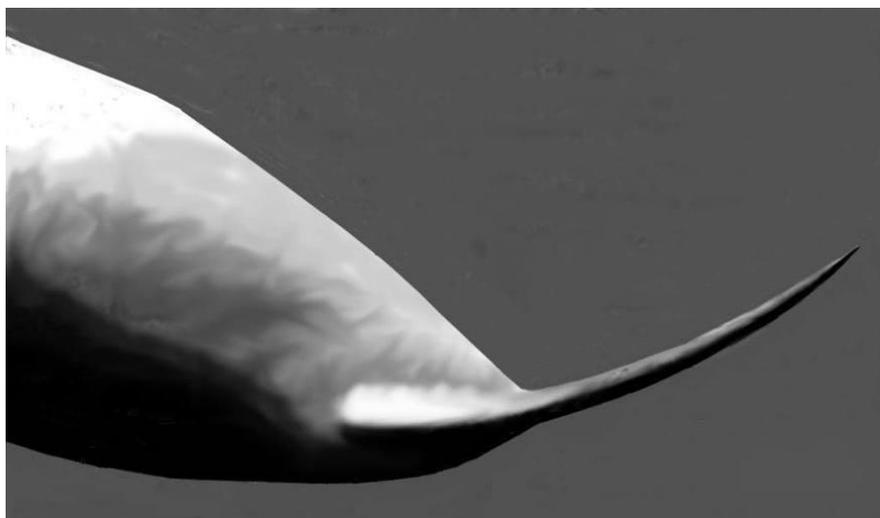


Рис. 3. Форма хвостовой лопасти дельфина в процессе активного плавания при движении сверху вниз (фото).

Для оценки эффективности хвостовой лопасти как двигателя ее обычно моделируют жестким крылом. Такие оценки дают приблизительные результаты, так как не учитывается гибкость лопасти.

Существуют теоретические и экспериментальные работы по исследованию гибких крыльев. Однако применить развитые в теоретических

исследованиях численные методы к оценке эффективности работы хвостовой лопасти дельфина как движителя весьма проблематично, так как отсутствуют систематические данные об упругих свойствах лопасти. Однако эту задачу можно решить, если воспользоваться методом, основанным на использовании коэффициентов аэродинамических производных. При этом нет необходимости знать упругие свойства лопасти, достаточно знать ее форму в процессе развития тяги.

В настоящей работе хвостовую лопасть дельфина моделировали двумя вариантами. В одном варианте профиль лопасти моделировали функцией

$$\eta(x, z, t) = \frac{y^*}{b} \left(\frac{x}{b}\right)^n \left(1 - \frac{z}{b}\right)^m \cos \omega t. \quad (2)$$

Это выражение без ограничения общности можно представить в виде

$$\eta = f_\delta(x, z) \delta(t), \quad (3)$$

где второй множитель в правой части является параметром, характеризующим временную зависимость деформации. В последнем выражении

$$f_\delta = \left(\frac{x}{b}\right)^n \left(1 - \frac{z}{b}\right)^m \quad (4)$$

и

$$\delta(t) = \frac{y^*}{b} \cos \omega t \quad (5)$$

Здесь y^* - максимальная, или характерная, величина смещения плоскости крыла Oxz .

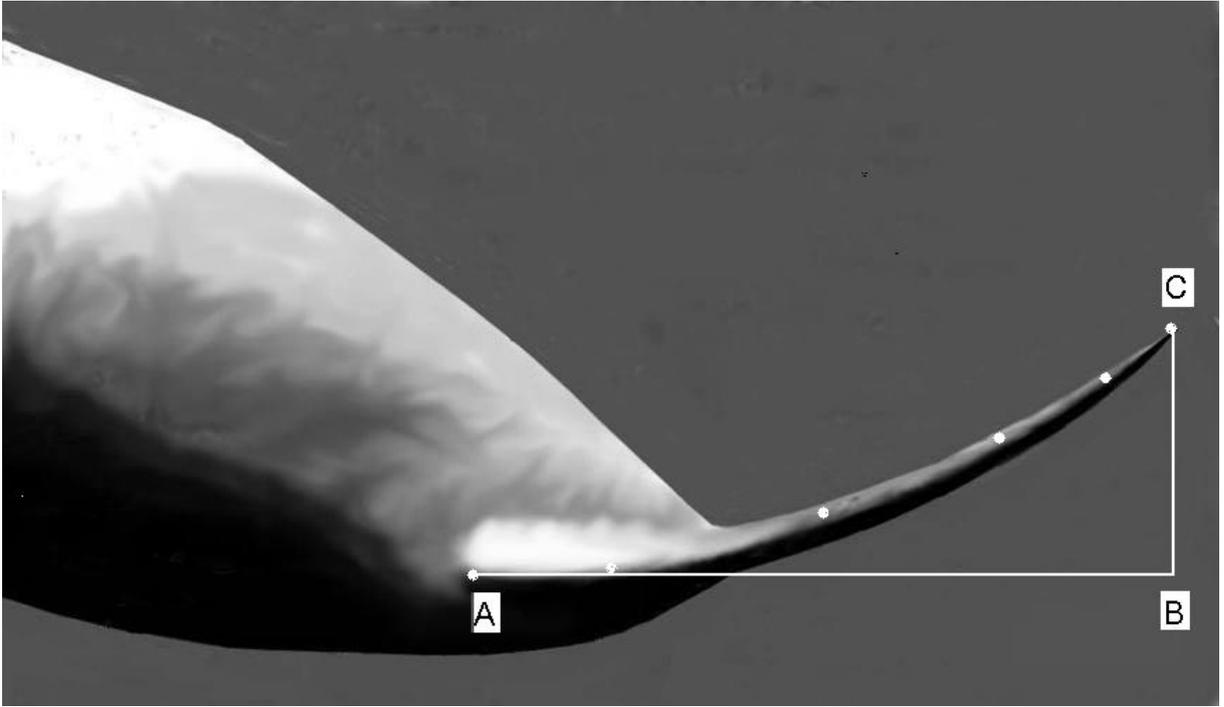


Рис. 4. Моделирование деформации лопасти дельфина функцией (2).

Для случая, представленного на рис. 4, имеем

$$f_{\delta} = \xi^2, m = 0 \quad (6),$$

и

$$\delta(t) = -0.332 \cos \omega t \quad (7)$$

Такое значение δ_0 , которое показано в формуле (7), получается, если в формуле (5) величину y^* измерять так, как показано на Рис. 4 (отрезок СВ). Однако, часть хвостовой лопасти приходится на концевые участки, которые мы не будем учитывать при определении δ_0 . Концом лопасти мы будем считать ее заднюю кромку, которая отстоит от кончиков лопасти приблизительно на 0.2 полной хорды (включающей концевые участки). Поэтому определение y^* по Рис. 4 (с учетом исключения концевых участков) приводит к величине $\delta_0 = 0.29$. Тогда получим

$$\delta(t) = -0.29 \cos \omega t \quad (8)$$

Здесь условие $m = 0$ обозначает отсутствие деформации по размаху крыла. Судя по многочисленным фотографиям хвостовой лопасти такая деформация либо отсутствует, либо пренебрежимо мала.

Во втором варианте хвостовую лопасть будем моделировать двухсекционным крылом, вписанным в профиль хвостовой лопасти, как показано на рис 5.

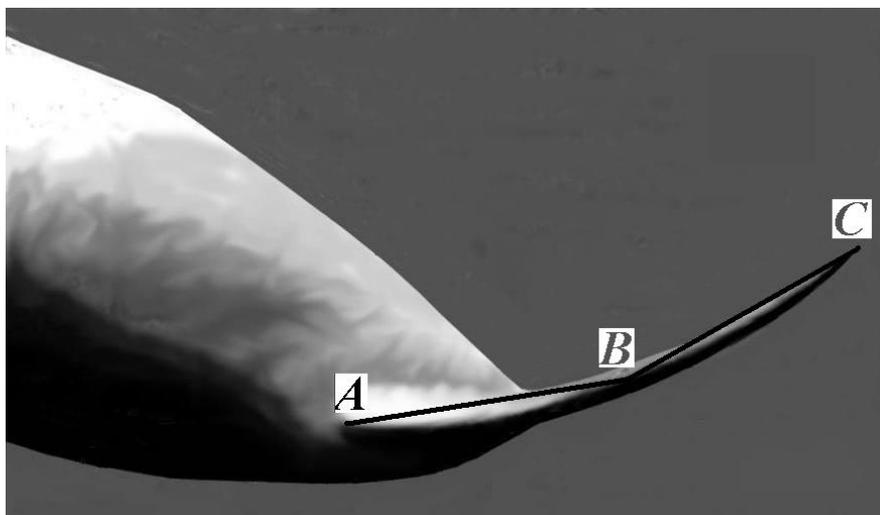


Рис. 5. Двухсекционное крыло ABC с шарниром в точке B (BC – подвижная часть).

Ниже показана схема двухсекционного крыла

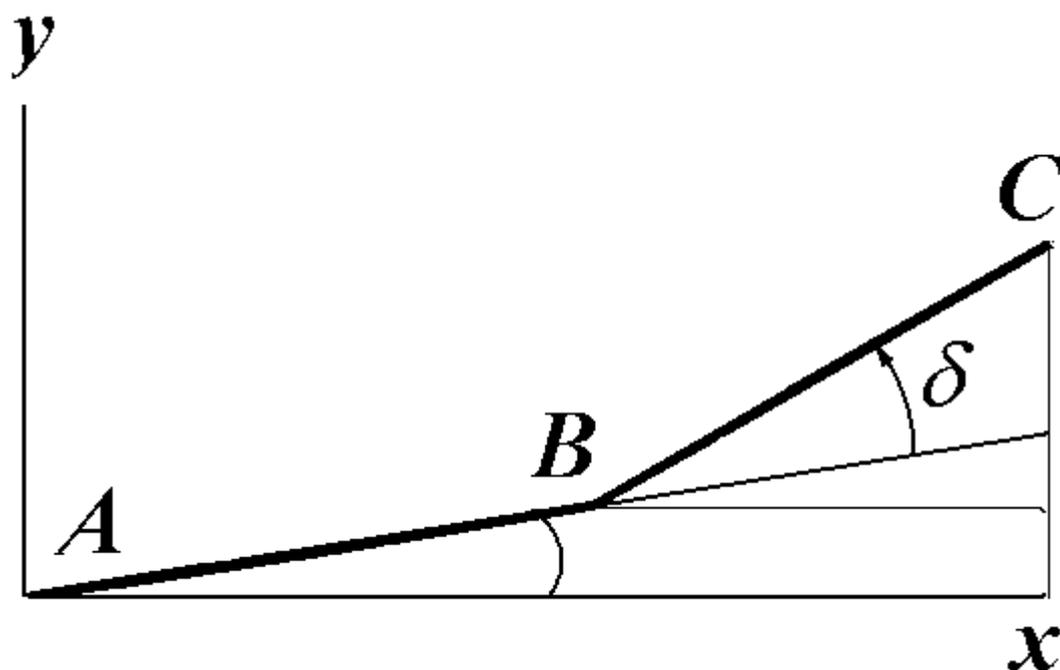


Рис. 6. Схема двухсекционного крыла.

Рассмотрим жесткое крыло, часть которого, примыкающая к задней кромке, может отклоняться на некоторый угол. Эта задача является вариантом аэродинамической задачи о колебаниях крыла с рулем и подробно исследована в работе Белоцерковского и Скрипача. Кроме угла отклонения важен еще размер подвижной части в хордах крыла. Этот параметр определяет значения коэффициентов аэродинамических производных, которые табулированы для бесконечного крыла и различных размеров отклоняющейся части.

В этом разделе мы получим расчетные формулы для более точной оценки индуктивного сопротивления двухсекционного жесткого крыла, учитывающие все основные кинематические параметры его движения. Общее выражение для индуктивного сопротивления крыла конечного размаха можно записать в виде (Романенко, 2001)

$$X_i = \rho\pi \int_{-l}^l b(z)u_*(z)(v_n - u_*(z))dz. \quad (9)$$

Здесь $b(z)$ - хорда крыла, $u_*(z)$ - скорость, индуцируемая следом, l – полуразмах крыла. Полагая, что $b(z)$, $u_*(z)$ и v_n не зависят от z в случае бесконечного и прямоугольного (большого удлинения) крыльев, получим после интегрирования

$$X_i = 2\rho\pi l b u_* (v_n - u_*). \quad (10)$$

Коэффициент индуктивного сопротивления имеет вид

$$C_i = \frac{2X_i}{\rho S U_0^2} = \frac{2\pi}{U_0^2} u_* (v_n - u_*). \quad (11)$$

Неизвестной величиной является скорость u_* , индуцируемая следом, которую в плоском случае находим из соотношения для подъемной силы

$$Y = -\lambda_{22}\dot{v}_n - \rho U \Gamma = -\lambda_{22}\dot{v}_n - \rho U \pi b \left(v_n - \frac{\omega_z b}{4} - u_* \right) \cos \alpha, \quad (12)$$

где λ_{22} - присоединенная масса крыла, U – мгновенная скорость потока, набегающего на крыло, α - угол атаки, ω_z - угловая скорость крыла. Точка над символом обозначает производную по времени.

С другой стороны значение подъемной силы в линейном приближении для деформируемого крыла определяется выражением

$$Y = \frac{\rho U^2 b}{2} \left(-C_y^\alpha \frac{v_n}{U} - C_y^{\dot{\alpha}} \frac{\dot{v}_n b}{U^2} + C_y^{\omega_z} \frac{\omega_z b}{U} + C_y^{\dot{\omega}_z} \frac{\dot{\omega}_z b^2}{U^2} + C_y^\delta \delta + C_y^{\dot{\delta}} \frac{\dot{\delta} b}{U} \right). \quad (13)$$

Здесь $C_y^\alpha, C_y^{\dot{\alpha}}, C_y^{\omega_z}, C_y^{\dot{\omega}_z}, C_y^\delta, C_y^{\dot{\delta}}$ - аэродинамические производные (Белоцерковский, 1958; Белоцерковский, Скрипач, Табачников, 1971), δ - угловая функция, определяющая деформацию крыла.

Приравняем правые части выражений (12) и (13)

$$\begin{aligned} & \frac{\rho U^2 b}{2} \left(-C_y^\alpha \frac{v_n}{U} - C_y^{\dot{\alpha}} \frac{\dot{v}_n b}{U^2} + C_y^{\omega_z} \frac{\omega_z b}{U} + C_y^{\dot{\omega}_z} \frac{\dot{\omega}_z b^2}{U^2} + C_y^\delta \delta + C_y^{\dot{\delta}} \frac{\dot{\delta} b}{U} \right) = \\ & = -\lambda_{22} \dot{v}_n - \rho U \pi b \left(v_n - \frac{\omega_z b}{4} - u_* \right) \cos \alpha. \end{aligned} \quad (14)$$

Левая часть формулы (14) состоит из шести членов, включающих в себя шесть переменных: $v_n, \dot{v}_n, \omega_z, \dot{\omega}_z, \delta, \dot{\delta}$. Представим u_* также состоящим из шести компонент: $u_* = u_1 + u_2 + u_3 + u_4 + u_5 + u_6$, каждая из которых включает в себя одну из этих переменных. Тогда выражение (14) примет вид

$$\begin{aligned} & \frac{\rho U^2 b}{2} \left(-C_y^\alpha \frac{v_n}{U} - C_y^{\dot{\alpha}} \frac{\dot{v}_n b}{U^2} + C_y^{\omega_z} \frac{\omega_z b}{U} + C_y^{\dot{\omega}_z} \frac{\dot{\omega}_z b^2}{U^2} + C_y^\delta \delta + C_y^{\dot{\delta}} \frac{\dot{\delta} b}{U} \right) = \\ & = -\lambda_{22} \dot{v}_n - \rho U \pi b \left(v_n - \frac{\omega_z b}{4} - u_1 - u_2 - u_3 - u_4 - u_5 - u_6 \right) \cos \alpha. \end{aligned} \quad (15)$$

2.2 Расчетные формулы для индуктивного сопротивления деформирующегося крыла

Выражение для u_* может быть получено для деформирующегося крыла в форме

$$u_* = \left(\begin{array}{l} v_n - \frac{v_n}{2\pi} C_y^\alpha + \frac{\omega_z b}{2\pi} C_y^{\omega_z} - \frac{\omega_z b}{4} + \frac{\lambda_{22} \dot{v}_n}{\rho \pi b U} - \\ - \frac{\dot{v}_n b}{2\pi U} C_y^{\dot{a}} + \frac{\dot{\omega}_z b^2}{2\pi U} C_y^{\dot{\omega}_z} + \frac{U}{2\pi} C_y^\delta \delta + \frac{1}{2\pi} C_y^\delta \dot{\delta} b \end{array} \right), \quad (16)$$

Формула для коэффициента индуктивного сопротивления (формула (11)) имеет вид

$$C_{T5} = -\frac{1}{U_0^2} \left(\begin{array}{l} \overline{D_1 v_{nc}^2 \cos \vartheta} + \overline{D_2 v_{nc} \omega_z \cos \vartheta} + \overline{D_3 \frac{v_{nc} \dot{\omega}_z}{U_c} \cos \vartheta} + \overline{D_4 \frac{v_{nc} \dot{v}_{nc}}{U_c} \cos \vartheta} + \\ + \overline{D_5 \frac{\dot{v}_{nc} \omega_z}{U_c} \cos \vartheta} + \overline{D_6 \omega_z^2 \cos \vartheta} + \overline{D_7 \frac{\omega_z \dot{\omega}_z}{U_c} \cos \vartheta} + \overline{D_8 \frac{\dot{v}_{nc}^2}{U_c^2} \cos \vartheta} + \\ \overline{D_9 \frac{\dot{v}_{nc} \dot{\omega}_z}{U_c^2} \cos \vartheta} + \overline{D_{10} \frac{\dot{\omega}_z^2}{U_c^2} \cos \vartheta} + \overline{D_{11} v_{nc} \delta U_c \cos \vartheta} + \overline{D_{12} v_{nc} \dot{\delta} b \cos \vartheta} + \\ + \overline{D_{13} \omega_z \delta U b \cos \vartheta} + \overline{D_{14} \omega_z \dot{\delta} b^2 \cos \vartheta} + \overline{D_{15} \dot{v}_{nc} \delta b \cos \vartheta} + \overline{D_{16} \frac{\dot{v}_{nc} \dot{\delta} b^2}{U_c} \cos \vartheta} + \\ + \overline{D_{17} \omega_z \delta b^2 \cos \vartheta} + \overline{D_{18} \frac{\dot{\omega}_z \dot{\delta} b^3}{U_c} \cos \vartheta} + \overline{D_{19} \delta^2 U_c^2 \cos \vartheta} + \overline{D_{20} (\dot{\delta}^2) b^2 \cos \vartheta} + \\ + \overline{D_{21} \delta \dot{\delta} U_c b \cos \vartheta} \end{array} \right). \quad (16)$$

В этой формуле первые 10 членов соответствуют жесткому крылу (недеформированному), следующие 11 членов (с 11 по 21) обусловлены наличием деформации крыла. После усреднения при фазовом сдвиге между линейными и угловыми колебаниями, равном 90 градусов, эти члены имеют вид (для недеформированного крыла)

$$C_{T5-1} = -D_1 \frac{\overline{v_{nc}^2 \cos \vartheta}}{U_0^2} = -D_1 \left(\frac{\overline{v_n^2 \cos \vartheta}}{U_0^2} + A_1 \right), \quad (17)$$

где

$$\frac{\overline{v_n^2 \cos \vartheta}}{U_0^2} = 0.5 \left[\begin{aligned} & \left(\frac{1}{\lambda_p} - g_0 \right)^2 - 1.125 g_0^2 \left(\frac{1}{\lambda_p^2} - 1.556 \frac{g_0}{\lambda_p} + 0.556 g_0^2 \right) + \\ & + 0.547 g_0^4 \left(\frac{1}{\lambda_p^2} - 1.162 \frac{g_0}{\lambda_p} + 0.289 g_0^2 \right) - \\ & - 0.137 g_0^6 \left(\frac{1}{\lambda_p^2} - 0.844 \frac{g_0}{\lambda_p} + 0.144 g_0^2 \right) \end{aligned} \right]. \quad (18)$$

и

$$D_1 = \left[C_y^\alpha \left(1 - \frac{1}{2\pi} C_y^\alpha \right) \right] \quad (18a)$$

Здесь и далее

$$A_1 = \frac{g_0^2 (Sh_0)^2 X^2}{2} \left[1 - \frac{g_0^2}{8} \left(1 - \frac{g_0^2}{24} \right) \right], \quad (19)$$

$$Sh_0 = \frac{\omega b}{U_0}, \quad (20)$$

X – относительное расстояние от оси вращения до центра крыла $\left(X = \frac{x}{b} \right)$, x – абсолютное расстояние от оси вращения до центра крыла (положительное, если ось вращения расположена ближе к задней кромке, отрицательное, если ось вращения расположена ближе к передней кромке), $\lambda_p = \frac{U_0}{\omega y_0}$, y_0 – амплитуда линейных колебаний крыла, $\omega = 2\pi f$, f – частота колебаний. Далее можно записать

$$C_{T5-2} = -D_2 \frac{A_1}{X}, \quad (21)$$

ЗДЕСЬ

$$D_2 = b \left(\frac{1}{\pi} C_y^\alpha C_y^{\omega_z} - \frac{1}{2} C_y^\alpha - C_y^{\omega_z} + \frac{\pi}{2} \right) \quad (22)$$

$$C_{T5-3} = -D_3 \left[-\frac{\sqrt{2}(Sh_0)^2 g_0}{\sqrt{2\lambda_p^2 + 1}} \right] (J_{3-1} + J_{3-2}), \quad (23)$$

где

$$D_3 = b^2 \left(\frac{1}{\pi} C_y^\alpha C_y^{\dot{\omega}_z} - C_y^{\dot{\omega}_z} \right), \quad (24)$$

$$J_{3-1} = \left\{ \begin{array}{l} \left(0.5 - 0.25g_0^2 + 0.0417g_0^4 \right) \left[1 + \frac{0.1875}{(2\lambda_p^2 + 1)^2} + \frac{0.1025}{(2\lambda_p^2 + 1)^4} \right] + \\ + \left(0.5 - 0.5g_0^2 + 0.125g_0^4 \right) \left[-\frac{0.25}{(2\lambda_p^2 + 1)} - \frac{0.1172}{(2\lambda_p^2 + 1)^3} \right] + \\ + \left(-0.25g_0^2 + 0.125g_0^4 \right) \left[0.5 + \frac{0.1406}{(2\lambda_p^2 + 1)^2} + \frac{0.085}{(2\lambda_p^2 + 1)^4} \right] \end{array} \right\}, \quad (25)$$

$$J_{3-2} = -\lambda_p \left\{ \begin{array}{l} \left(0.5g_0 - 0.1667g_0^3 + 0.0167g_0^5 \right) \left[1 + \frac{0.1875}{(2\lambda_p^2 + 1)^2} + \frac{0.1025}{(2\lambda_p^2 + 1)^4} \right] + \\ + \left(0.5g_0 - 0.3333g_0^3 + 0.05g_0^5 \right) \left[-\frac{0.25}{(2\lambda_p^2 + 1)} - \frac{0.1172}{(2\lambda_p^2 + 1)^3} \right] + \\ + \left(-0.1667g_0^3 + 0.05g_0^5 \right) \left[0.5 + \frac{0.1406}{(2\lambda_p^2 + 1)^2} + \frac{0.085}{(2\lambda_p^2 + 1)^4} \right] \end{array} \right\}. \quad (26)$$

Далее

$$C_{T5-4} = -D_4 \frac{v_{nc} \dot{v}_{nc}}{U_0^2 U_c} \cos \vartheta = 0, \quad (27)$$

здесь

$$D_4 = b \left(\frac{2\lambda_{22}}{\rho\pi b^2} C_y^\alpha - \frac{1}{\pi} C_y^\alpha C_y^{\dot{\alpha}} + C_y^{\dot{\alpha}} - \frac{2\lambda_{22}}{\rho b^2} \right), \quad (28)$$

$$C_{T5-5} = -D_5 \left[-\frac{\sqrt{2}(Sh_0)^2 g_0^2}{\sqrt{2\lambda_p^2 + 1}} \right] \{J_{5-1} + J_{5-2} + J_{5-3}\}, \quad (29)$$

где

$$D_5 = b^2 \left(-\frac{1}{2} C_y^{\omega_z} + \frac{1}{\pi} C_y^{\dot{\alpha}} C_y^{\omega_z} + \frac{\pi}{4} - \frac{1}{2} C_y^{\dot{\alpha}} \right), \quad (30)$$

$$J_{5-1} = - \left\{ \begin{aligned} & \left(0.5 + \frac{0.125}{(2\lambda_p^2 + 1)} + \frac{0.0938}{(2\lambda_p^2 + 1)^2} + \frac{0.0586}{(2\lambda_p^2 + 1)^3} + \frac{0.0513}{(2\lambda_p^2 + 1)^4} \right) + \\ & + (-0.25g_0^2 + 0.0417g_0^4) \left[0.5 + \frac{0.0469}{(2\lambda_p^2 + 1)^2} + \frac{0.0171}{(2\lambda_p^2 + 1)^4} \right] + \\ & 0.0417g_0^4 \left[-\frac{0.0625}{(2\lambda_p^2 + 1)} - \frac{0.0195}{(2\lambda_p^2 + 1)^3} \right] \end{aligned} \right\}, \quad (31)$$

$$J_{5-2} = \mathcal{G}_0 \left\{ \begin{aligned} & \left(0.25\mathcal{G}_0 - 0.083\mathcal{G}_0^3 + 0.0083\mathcal{G}_0^5 \right) \left[0.5 + \frac{0.0469}{(2\lambda_p^2 + 1)^2} + \frac{0.0171}{(2\lambda_p^2 + 1)^4} \right] + \\ & + \left(-0.083\mathcal{G}_0^3 + 0.0167\mathcal{G}_0^5 \right) \left[-\frac{0.0625}{(2\lambda_p^2 + 1)} - \frac{0.0196}{(2\lambda_p^2 + 1)^3} \right] \end{aligned} \right\}, \quad (32)$$

$$J_{5-3} = -\mathcal{G}_0 \lambda_p \left\{ \begin{aligned} & \left(0.5 + \frac{0.125}{(2\lambda_p^2 + 1)} + \frac{0.0938}{(2\lambda_p^2 + 1)^2} + \frac{0.0586}{(2\lambda_p^2 + 1)^3} + \frac{0.0513}{(2\lambda_p^2 + 1)^4} \right) + \\ & + \left(-0.25\mathcal{G}_0^2 + 0.0417\mathcal{G}_0^4 \right) \left[0.5 + \frac{0.0469}{(2\lambda_p^2 + 1)^2} + \frac{0.0171}{(2\lambda_p^2 + 1)^4} \right] + \\ & 0.0417\mathcal{G}_0^4 \left[-\frac{0.0625}{(2\lambda_p^2 + 1)} - \frac{0.0195}{(2\lambda_p^2 + 1)^3} \right] \end{aligned} \right\}. \quad (33)$$

$$C_{T5-6} = -D_6 \left[(Sh_0)^2 \mathcal{G}_0^2 \right] \{ J_{6-1} \}, \quad (34)$$

где

$$D_6 = b^2 \left[-\frac{1}{2\pi} (C_y^{\omega_z})^2 + \frac{1}{2} C_y^{\omega_z} - \frac{\pi}{8} \right], \quad (35)$$

$$J_{6-1} = (0.5 - 0.0625\mathcal{G}_0^2 + 0.0026\mathcal{G}_0^4). \quad (36)$$

$$C_{T5-7} = -D_7 \frac{\overline{\omega_z \dot{\omega}_z}}{U_0^2 U_c} \cos \mathcal{G} = 0, \quad (37)$$

где

$$D_7 = b^3 \left(-\frac{1}{\pi} C_y^{\omega_z} C_y^{\dot{\omega}_z} + \frac{1}{2} C_y^{\dot{\omega}_z} \right). \quad (38)$$

$$C_{T5-8} = -D_8 \left[\frac{2(Sh_0)^2}{(2\lambda_p^2 + 1)} \right] \left\{ \sum_1^7 J_{8-n} \right\} \quad (39)$$

где

$$D_8 = b^2 \left[\frac{2\lambda_{22}}{\rho\pi b^2} C_y^\alpha - \frac{2(\lambda_{22})^2}{\rho^2 \pi b^4} - \frac{1}{2\pi} (C_y^\alpha)^2 \right], \quad (40)$$

$$J_{8-1} = \left\{ \begin{aligned} & 0.5 + \frac{0.25}{(2\lambda_p^2 + 1)} + \frac{0.25}{(2\lambda_p^2 + 1)^2} + \frac{0.1875}{(2\lambda_p^2 + 1)^3} + \frac{0.1875}{(2\lambda_p^2 + 1)^4} + \\ & + \frac{0.0794}{(2\lambda_p^2 + 1)^5} + \frac{0.0366}{(2\lambda_p^2 + 1)^6} + \\ & + (-0.375\mathcal{G}_0^2 + 0.1093\mathcal{G}_0^4 - 0.0156\mathcal{G}_0^6) \left[\begin{aligned} & 0.5 + \frac{0.125}{(2\lambda_p^2 + 1)^2} + \\ & + \frac{0.0625}{(2\lambda_p^2 + 1)^4} + \frac{0.0091}{(2\lambda_p^2 + 1)^6} \end{aligned} \right] + \\ & + (0.1093\mathcal{G}_0^4 - 0.0313\mathcal{G}_0^6) \left[\begin{aligned} & -\frac{0.125}{(2\lambda_p^2 + 1)} - \frac{0.0625}{(2\lambda_p^2 + 1)^3} - \\ & -\frac{0.0198}{(2\lambda_p^2 + 1)^5} - \frac{0.0047}{(2\lambda_p^2 + 1)^7} \end{aligned} \right] + \\ & + (-0.0156\mathcal{G}_0^6) \left[\begin{aligned} & 0.125 + \frac{0.0625}{(2\lambda_p^2 + 1)^2} + \frac{0.0391}{(2\lambda_p^2 + 1)^4} + \frac{0.0064}{(2\lambda_p^2 + 1)^6} \end{aligned} \right] \end{aligned} \right\}, \quad (41)$$

$$J_{8-2} = -2\mathcal{G}_0 \left\{ \begin{aligned} & \left(0.25\mathcal{G}_0 - 0.1458\mathcal{G}_0^3 + 0.0318\mathcal{G}_0^5 \right) \left[0.5 + \frac{0.125}{(2\lambda_p^2 + 1)^2} + \frac{0.0625}{(2\lambda_p^2 + 1)^4} \right] + \\ & + \left(-0.1458\mathcal{G}_0^3 + 0.0635\mathcal{G}_0^5 - 0.01\mathcal{G}_0^7 \right) \left[\frac{0.125}{(2\lambda_p^2 + 1)} - \frac{0.0625}{(2\lambda_p^2 + 1)^3} - \frac{0.02}{(2\lambda_p^2 + 1)^5} \right] + \\ & + \left(0.0547\mathcal{G}_0^4 - 0.0469\mathcal{G}_0^6 \right) \left[\frac{0.125 + \frac{0.0625}{(2\lambda_p^2 + 1)^2} + \frac{0.039}{(2\lambda_p^2 + 1)^4} + \frac{0.0064}{(2\lambda_p^2 + 1)^6} \right] \end{aligned} \right\}, \quad (42)$$

$$J_{8-3} = \mathcal{G}_0^2 \left\{ \begin{aligned} & \left(0.125\mathcal{G}_0^2 - 0.052\mathcal{G}_0^4 + 0.0071\mathcal{G}_0^6 \right) \left[0.5 + \frac{0.125}{(2\lambda_p^2 + 1)^2} + \frac{0.0625}{(2\lambda_p^2 + 1)^4} + \frac{0.0091}{(2\lambda_p^2 + 1)^6} \right] + \\ & + \left(0.125\mathcal{G}_0^2 - 0.104\mathcal{G}_0^4 + 0.0213\mathcal{G}_0^6 \right) \left[\frac{0.125}{(2\lambda_p^2 + 1)} - \frac{0.0625}{(2\lambda_p^2 + 1)^3} - \frac{0.0198}{(2\lambda_p^2 + 1)^5} \right] + \\ & + \left(-0.052\mathcal{G}_0^4 + 0.0213\mathcal{G}_0^6 \right) \left[\frac{0.125 + \frac{0.0625}{(2\lambda_p^2 + 1)^2} + \frac{0.0391}{(2\lambda_p^2 + 1)^4} + \frac{0.0064}{(2\lambda_p^2 + 1)^6} \right] \end{aligned} \right\}, \quad (43)$$

$$J_{8-4} = -2\mathcal{G}_0 \lambda_p J_{8-1}, \quad (44)$$

$$J_{8-5} = -\mathcal{G}_0 \lambda_p J_{8-2}, \quad (45)$$

$$J_{8-6} = g_0^2 \lambda_p^2 J_{8-1}, \quad (46)$$

$$J_{8-7} = (Sh_0)^2 g_0^2 \lambda_p^2 X^2 \left[\begin{array}{l} 0.5 - \frac{0.125}{(2\lambda_p^2 + 1)} + \frac{0.125}{(2\lambda_p^2 + 1)^2} - \frac{0.1875}{(2\lambda_p^2 + 1)^3} + \frac{0.1875}{(2\lambda_p^2 + 1)^4} - \\ - \frac{0.0794}{(2\lambda_p^2 + 1)^5} + \frac{0.0732}{(2\lambda_p^2 + 1)^6} - \frac{0.0234}{(2\lambda_p^2 + 1)^7} + \frac{0.02}{(2\lambda_p^2 + 1)^8} \end{array} \right]. \quad (47)$$

$$C_{T5-9} = -D_9 \left[\frac{2(Sh_0)^4 g_0^2 \lambda_p^2 X}{(2\lambda_p^2 + 1)} \right] \{J_{9-1}\}, \quad (48)$$

где

$$D_9 = b^3 \left(-\frac{2\lambda_{22}}{\rho\pi b^2} C_y^{\dot{\omega}_z} + \frac{1}{\pi} C_y^{\dot{\alpha}} C_y^{\dot{\omega}_z} \right), \quad (49)$$

$$J_{9-1} = \left\{ \begin{array}{l} (0.5 - 0.125g_0^2 + 0.0052g_0^4) \left[\begin{array}{l} 1 + \frac{0.5}{(2\lambda_p^2 + 1)^2} + \frac{0.1875}{(2\lambda_p^2 + 1)^4} + \\ + \frac{0.0732}{(2\lambda_p^2 + 1)^6} + \frac{0.02}{(2\lambda_p^2 + 1)^8} \end{array} \right] + \\ + (0.5 - 0.25g_0^2 + 0.0156g_0^4) \left[\begin{array}{l} -\frac{0.5}{(2\lambda_p^2 + 1)} - \frac{0.375}{(2\lambda_p^2 + 1)^3} - \\ - \frac{0.1588}{(2\lambda_p^2 + 1)^5} - \frac{0.0467}{(2\lambda_p^2 + 1)^7} \end{array} \right] + \\ + (-0.125g_0^2 + 0.0156g_0^4) \left[\begin{array}{l} 0.5 + \frac{0.375}{(2\lambda_p^2 + 1)^2} + \frac{0.3125}{(2\lambda_p^2 + 1)^4} + \\ + \frac{0.064}{(2\lambda_p^2 + 1)^6} + \frac{0.0184}{(2\lambda_p^2 + 1)^8} \end{array} \right] \end{array} \right\}. \quad (50)$$

$$C_{T5-10} = -D_{10} \left[\frac{2(Sh_0)^4 g_0^2 \lambda_p^2}{(2\lambda_p^2 + 1)} \right] \{J_{10-1}\}, \quad (51)$$

где

$$D_{10} = -\frac{b^4}{2\pi} (C_y^{\dot{\omega}_z})^2, \quad (52)$$

$$J_{10-1} = J_{9-1}. \quad (53)$$

Для деформированного крыла

$$C_{T5-11} = -D_{11} \left\{ \frac{\delta_0 \sqrt{2\lambda_p^2 + 1}}{2\sqrt{2}\lambda_p^2} \left[\begin{array}{l} 1 + \frac{0.25}{(2\lambda_p^2 + 1)} - 0.5g_0^2 \left(1.5 + \frac{0.5}{(2\lambda_p^2 + 1)} \right) + \\ + 0.156g_0^4 \left(1 + \frac{0.375}{(2\lambda_p^2 + 1)} \right) - \\ - g_0 \lambda_p \left(1 + \frac{0.25}{(2\lambda_p^2 + 1)} - 0.5g_0^2 \left(1 + \frac{0.3333}{(2\lambda_p^2 + 1)} \right) + \right. \\ \left. + 0.052g_0^4 \left(1 + \frac{0.375}{(2\lambda_p^2 + 1)} \right) \right] \right\}, \quad (54)$$

где

$$D_{11} = \left[\frac{1}{\pi} C_y^\alpha C_y^\delta - C_y^\delta \right]. \quad (55)$$

$$C_{T5-12} = -D_{12} \left[\frac{(Sh_0)^2 \delta_0 g_0 X}{2} (1 - 0.125g_0^2) \right], \quad (56)$$

где

$$D_{12} = b \left[\frac{1}{\pi} C_y^\alpha C_y^\delta - C_y^\delta \right]. \quad (57)$$

$$C_{T5-13} = -D_{13} \frac{\omega_z \delta U_c b \cos \vartheta}{U_0^2} = 0, \quad (58)$$

где

$$D_{13} = b \left[-\frac{1}{\pi} C_y^{\omega_z} C_y^\delta + \frac{1}{2} C_y^\delta \right]. \quad (59)$$

$$C_{T5-14} = -D_{14} \left[\frac{(Sh_0)^2 \delta_0 \vartheta_0}{2} (1 - 0.125 \vartheta_0^2) \right], \quad (60)$$

где

$$D_{14} = b^2 \left[-\frac{1}{\pi} C_y^{\omega_z} C_y^\delta + \frac{1}{2} C_y^\delta \right]. \quad (61)$$

$$C_{T5-15} = -D_{15} \left[-\frac{(Sh_0)^2 \delta_0 \vartheta_0 X}{2} (1 - 0.375 \vartheta_0^2) \right], \quad (62)$$

где

$$D_{15} = b \left[\frac{1}{\pi} C_y^{\dot{\alpha}} C_y^\delta - \frac{2\lambda_{22}}{\rho \pi b^2} C_y^\delta \right]. \quad (63)$$

$$C_{T5-16} = -D_{16} \left[\frac{\sqrt{2} (Sh_0)^2 \delta_0}{2\sqrt{(2\lambda_p^2 + 1)}} \left(1 + \frac{0.25}{(2\lambda_p^2 + 1)} + \frac{0.1875}{(2\lambda_p^2 + 1)^2} + \frac{0.1172}{(2\lambda_p^2 + 1)^3} + \frac{0.1025}{(2\lambda_p^2 + 1)^4} \right) \right], \quad (64)$$

где

$$D_{16} = b^2 \left[\frac{1}{\pi} C_y^{\dot{\alpha}} C_y^\delta - \frac{2\lambda_{22}}{\rho \pi b^2} C_y^\delta \right]. \quad (65)$$

$$C_{T5-17} = -D_{17} \left[-\frac{(Sh_0)^2 \delta_0 \vartheta_0}{2} (1 - 0.375 \vartheta_0^2) \right], \quad (66)$$

где

$$D_{17} = b^2 \left[-\frac{1}{\pi} C_y^{\dot{\omega}_z} C_y^\delta \right]. \quad (67)$$

$$C_{T5-18} = -D_{18} \frac{\dot{\omega}_z \dot{\delta} b^3}{U_0^2 U_c} = 0, \quad (68)$$

где

$$D_{18} = b^3 \left[-\frac{1}{\pi} C_y^{\dot{\omega}_z} C_y^\delta \right]. \quad (69)$$

$$C_{T5-19} = -D_{19} \left[\frac{\delta_0^2 (2\lambda_p^2 + 1)}{4\lambda_p^2} \right] \left[1 + \frac{0.625}{(2\lambda_p^2 + 1)} - 0.375 g_0^2 \left(1 - \frac{0.3}{(2\lambda_p^2 + 1)} \right) \right], \quad (70)$$

где

$$D_{19} = \left[-\frac{1}{2\pi} (C_y^\delta)^2 \right]. \quad (71)$$

$$C_{T5-20} = -D_{20} \left[\frac{(Sh_0)^2 \delta_0^2}{2} \right] [1 - 0.125 g_0^2], \quad (72)$$

где

$$D_{20} = b^2 \left[-\frac{1}{2\pi} (C_y^\delta)^2 \right]. \quad (73)$$

$$C_{T5-21} = -D_{21} \frac{\overline{\delta \dot{\delta} U_c \sin \vartheta}}{U_0^2} = 0, \quad (74)$$

$$D_{21} = \frac{1}{\pi} C_{yc}^{\delta} C_{yc}^{\delta} \cdot \quad (75)$$

3 Траектории движения электрочувствительных рыб в слабых электрических полях

Один из разделов данного проекта связан с проблемой изучения систем электроориентации рыб. Целью раздела является изучение механизмов электровосприятия у представителей определенных таксонов водных животных и создание специальных методик, позволяющих оценивать поведение рыб в слабых электрических полях.

В отчетном году было разработано программное обеспечение в среде MATLAB и собрана экспериментальная установка, позволившие усовершенствовать ранее созданные методы регистрации траекторий движения рыб в электрических полях (см. Отчет за 2013 год). Блок-схема программы приведена на рис 7.

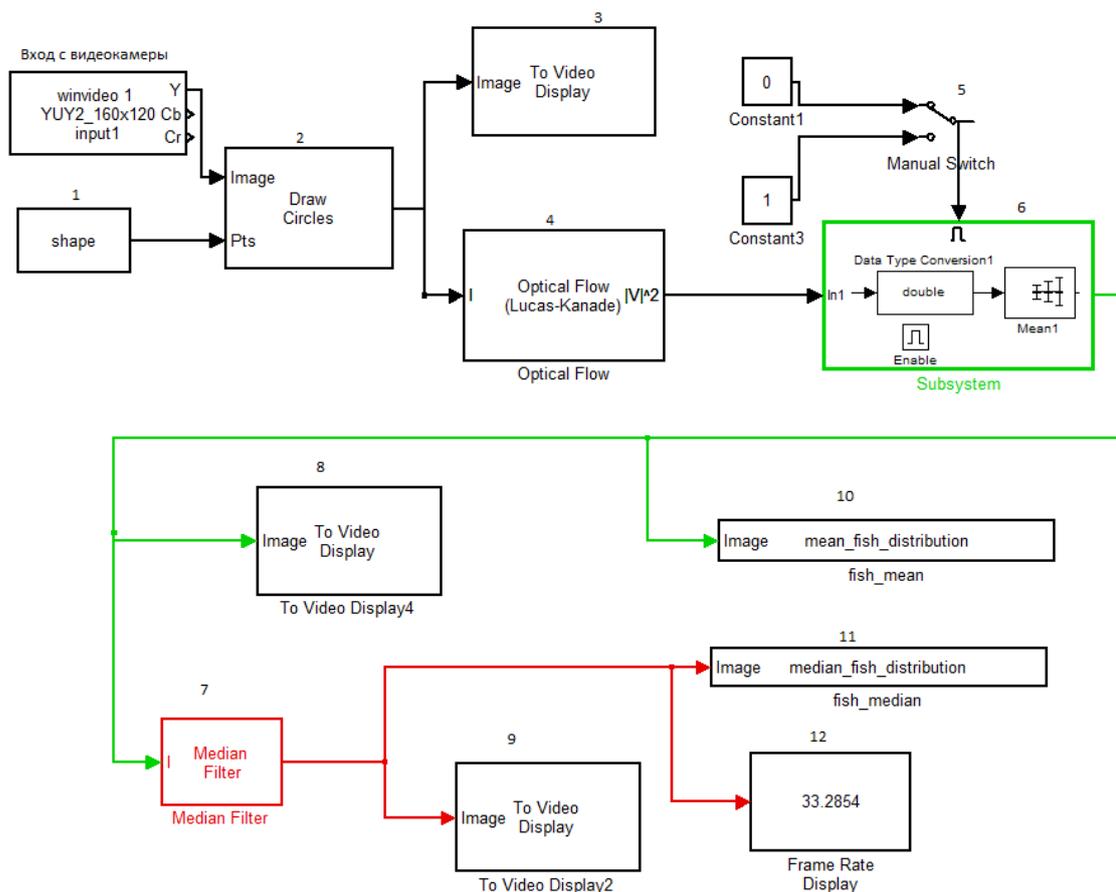


Рис. 7. Блок-схема аппаратурно-программного обеспечения.

Видеосигнал получают с обычной веб-камеры. Для освещения используются светодиоды, расположенные равномерно по краям круглого бассейна. При этом в кадр могут попадать отражения этих светодиодов в воде. Иногда рыба может создать на воде волны, и тогда отражения светодиодов могут двигаться и вносить шум в результат. Для уменьшения этого эффекта используются блоки **1** и **2**, которые накладывают на изображение круглую маску и вырезают отражения от светодиодов. Контроль изображения с маской осуществляется с помощью дисплея **3**. Детектирование движения производится с помощью блока **4** – так называемого детектора оптического потока. Этот блок вычисляет направление и скорость движения объекта от одного кадра к другому, используя метод Lucas-Kanade.

Для вычисления оптического потока между двумя кадрами, надо решить следующее уравнение:

$$I_x u + I_y v + I_t = 0 \quad (76)$$

где I_x , I_y и I_t - пространственно-временные производные яркости изображения, u – горизонтальный оптический поток, v – вертикальный оптический поток.

Для решения используется метод Lucas-Kanade: изображение делится на множество мелких частей и предполагается, что в каждая такая часть имеет постоянную скорость. Затем производится аппроксимация методом взвешенных наименьших квадратов уравнения оптического потока моделью с константами $[u \ v]^T$ для каждой части Ω . Для этого минимизируют уравнение

$$\sum_{x \in \Omega} W^2 [I_x u + I_y v + I_t]^2 \quad (77)$$

где W – оконная функция, выделяющая составляющие в центре каждой части. Решение проблемы минимизации выражается следующим уравнением:

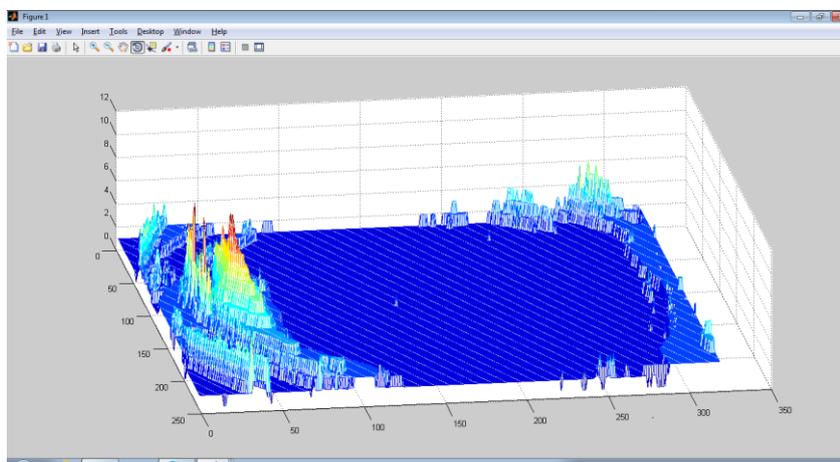
$$\begin{bmatrix} \sum W^2 I_x^2 & \sum W^2 I_x I_y \\ \sum W^2 I_y I_x & \sum W^2 I_y^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \sum W^2 I_x I_t \\ \sum W^2 I_y I_t \end{bmatrix} \quad (78)$$

В методе Lucas-Kanade I_t вычисляется при помощи разностного фильтра. Переключатель **5** нужен для того, чтобы при включении программы первый кадр не записывался, иначе в оптическом потоке будут присутствовать все точки изображения, что сильно загрязнит результат. В положении **1** переключатель активирует блок **6**. В блоке **6** результат, являющийся оптическим потоком изображения, накапливается и усредняется.

Полученные данные в реальном времени контролируются при помощи дисплеев **8** и **9**. Данные по сути представляют собой усреднение по времени точек пространства, в которых происходило движение объектов, то есть если рыба не двигалась, то ничего не записывалось, а при движении происходило накопление.

Для уменьшения резких выбросов можно применить медианный фильтр **7**. Разница в изображении распределения движения с применением такого фильтра (**Б**) и без него (**А**) показана на рис **8**.

А.



Б.

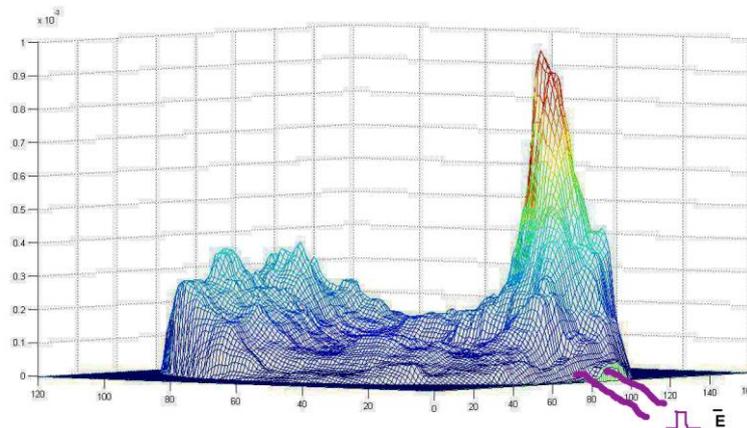


Рис 8. Распределения движения с применением фильтра (Б) и без него (А)

Блоки **10** и **11** предназначены для сохранения результатов в среде Matlab для дальнейшей обработки и визуализации. Для визуализации использовались команды Matlab «Surf» и «Mesh». Реальная частота обработанных кадров показывается на мониторе **12**.

Фрагменты программы в *MATLAB*:

```
Model {
    Name          "v03"
    Version       7.5
    MdlSubVersion 0
    GraphicalInterface {
        NumRootInports    0
        NumRootOutports   0
        ParameterArgumentNames ""
        ComputedModelVersion "1.6"
```

```

    NumModelReferences      0
    NumTestPointedSignals  0
}
SavedCharacterEncoding    "windows-1251"
SaveDefaultBlockParams   on
ScopeRefreshTime         0.035000
OverrideScopeRefreshTime on
DisableAllScopes         off
DataTypeOverride          "UseLocalSettings"
MinMaxOverflowLogging     "UseLocalSettings"
MinMaxOverflowArchiveMode "Overwrite"
MaxMDLFileLineLength     120
Created                   "Thu Jun 06 12:17:23 2013"
Creator                   "User"
UpdateHistory             "UpdateHistoryNever"
ModifiedByFormat          "%<Auto>"
LastModifiedBy           "User"
ModifiedDateFormat        "%<Auto>"
LastModifiedDate         "Wed Feb 26 11:51:51 2014"
RTWModifiedTimeStamp     315317231
ModelVersionFormat        "1.%<AutoIncrement:6>"
ConfigurationManager     "None"
SampleTimeColors         off
SampleTimeAnnotations    off
LibraryLinkDisplay       "none"
WideLines                off
ShowLineDimensions       off
ShowPortDataTypes       off
ShowLoopsOnError         on
IgnoreBidirectionalLines off

```

ShowStorageClass off
ShowTestPointIcons on
ShowSignalResolutionIcons on
ShowViewerIcons on
SortedOrder off
ExecutionContextIcon off
ShowLinearizationAnnotations on
BlockNameDataTip off
BlockParametersDataTip off
BlockDescriptionStringDataTip off
ToolBar on
StatusBar on
BrowserShowLibraryLinks off
BrowserLookUnderMasks off
SimulationMode "normal"
LinearizationMsg "none"
Profile off
ParamWorkspaceSource "MATLABWorkspace"
AccelSystemTargetFile "accel.tlc"
AccelTemplateMakefile "accel_default_tmf"
AccelMakeCommand "make_rtw"
TryForcingSFcnDF off
RecordCoverage off
CovPath "/"
CovSaveName "covdata"
CovMetricSettings "dw"
CovNameIncrementing off
CovHtmlReporting on
CovForceBlockReductionOff on
covSaveCumulativeToWorkspaceVar on

CovSaveSingleToWorkspaceVar on
CovCumulativeVarName "covCumulativeData"
CovCumulativeReport off
CovReportOnPause on
CovModelRefEnable "Off"
CovExternalEMLEnable off
ExtModeBatchMode off
ExtModeEnableFloating on
ExtModeTrigType "manual"
ExtModeTrigMode "normal"
ExtModeTrigPort "1"
ExtModeTrigElement "any"
ExtModeTrigDuration 1000
ExtModeTrigDurationFloating "auto"
ExtModeTrigHoldOff 0
ExtModeTrigDelay 0
ExtModeTrigDirection "rising"
ExtModeTrigLevel 0
ExtModeArchiveMode "off"
ExtModeAutoIncOneShot off
ExtModeIncDirWhenArm off
ExtModeAddSuffixToVar off
ExtModeWriteAllDataToWs off
ExtModeArmWhenConnect on
ExtModeSkipDownloadWhenConnect off
ExtModeLogAll on
ExtModeAutoUpdateStatusClock on
BufferReuse on
ShowModelReferenceBlockVersion off
ShowModelReferenceBlockIO off

```

Array {
  Type          "Handle"
  Dimension     1
  Simulink.ConfigSet {
    $ObjectID   1
    Version     "1.10.0"
    Array {
      Type          "Handle"
      Dimension     8
      Simulink.SolverCC {
        $ObjectID   2
        Version     "1.10.0"
        StartTime   "0.0"
        StopTime    "inf"
        AbsTol      "auto"
        FixedStep   "auto"
        InitialStep "auto"
        MaxNumMinSteps "-1"
        MaxOrder    5
        ZcThreshold "auto"
        ConsecutiveZCsStepRelTol "10*128*eps"
        MaxConsecutiveZCs "1000"
        ExtrapolationOrder 4
        NumberNewtonIterations 1
        MaxStep       "auto"
        MinStep       "auto"
        MaxConsecutiveMinStep "1"
        RelTol        "1e-3"
        SolverMode    "Auto"
        Solver        "ode45"
      }
    }
  }
}

```

```

SolverName          "ode45"
SolverJacobianMethodControl "auto"
ShapePreserveControl "DisableAll"
ZeroCrossControl    "UseLocalSettings"
ZeroCrossAlgorithm   "Nonadaptive"
AlgebraicLoopSolver  "TrustRegion"
SolverResetMethod    "Fast"
PositivePriorityOrder off
AutoInsertRateTranBlk off
SampleTimeConstraint "Unconstrained"
InsertRTBMode        "Whenever possible"
}
Simulink.DataIOCC {
  $ObjectID      3
  Version         "1.10.0"
  Decimation      "1"
  ExternalInput   "[t, u]"
  FinalStateName  "xFinal"
  InitialState    "xInitial"
  LimitDataPoints on
  MaxDataPoints   "1000"
  LoadExternalInput off
  LoadInitialState off
  SaveFinalState  off
  SaveCompleteFinalSimState off
  SaveFormat       "Array"
  SaveOutput       on
  SaveState        off
  SignalLogging    on
  DSMLogging       on
}

```

```

InspectSignalLogs    off
SaveTime             on
ReturnWorkspaceOutputs  off
StateSaveName        "xout"
TimeSaveName         "tout"
OutputSaveName       "yout"
SignalLoggingName    "logout"
DSMLoggingName       "dsmout"
OutputOption         "RefineOutputTimes"
OutputTimes          "[]"
ReturnWorkspaceOutputsName "out"
Refine               "1"
}
Simulink.OptimizationCC {
  $ObjectID          4
  Version            "1.10.0"
  Array {
    Type              "Cell"
    Dimension          7
    Cell               "BooleansAsBitFields"
    Cell               "PassReuseOutputArgsAs"
    Cell               "PassReuseOutputArgsThreshold"
    Cell               "ZeroExternalMemoryAtStartup"
    Cell               "ZeroInternalMemoryAtStartup"
    Cell               "OptimizeModelRefInitCode"
    Cell               "NoFixptDivByZeroProtection"
    PropName           "DisabledProps"
  }
}

```

Разработанное программно-компьютерное обеспечение позволило выполнить серии экспериментов, в которых оказывается возможным получить картину распределения положения рыбы в аквариуме при ее движении (траектории), то есть учитываются только те моменты, в которых рыба проявляла двигательную активность. Проведены серии экспериментов, в которых на электроды дипольного типа, зарытые в определенные места бассейна и невидимые исследуемой электрочувствительной рыбой, подавались серии прямоугольных импульсов различной напряженности и скважности.. Показано, что в зависимости от параметров предъявляемого электрического поля возможно наблюдать, как скопление траекторий вблизи его источника, так и избегание поля (в случаях более сильных напряженностей).

В качестве примера на Рис 9 представлен результат часовой записи двигательной активности сома *Clarias* при подключении электрического поля ($E = 1$ мВ/см, 1/сек) к электродам. Налицо эффект избегания подобного рода воздействия (концентрация активности в удаленной зоне аквариума).

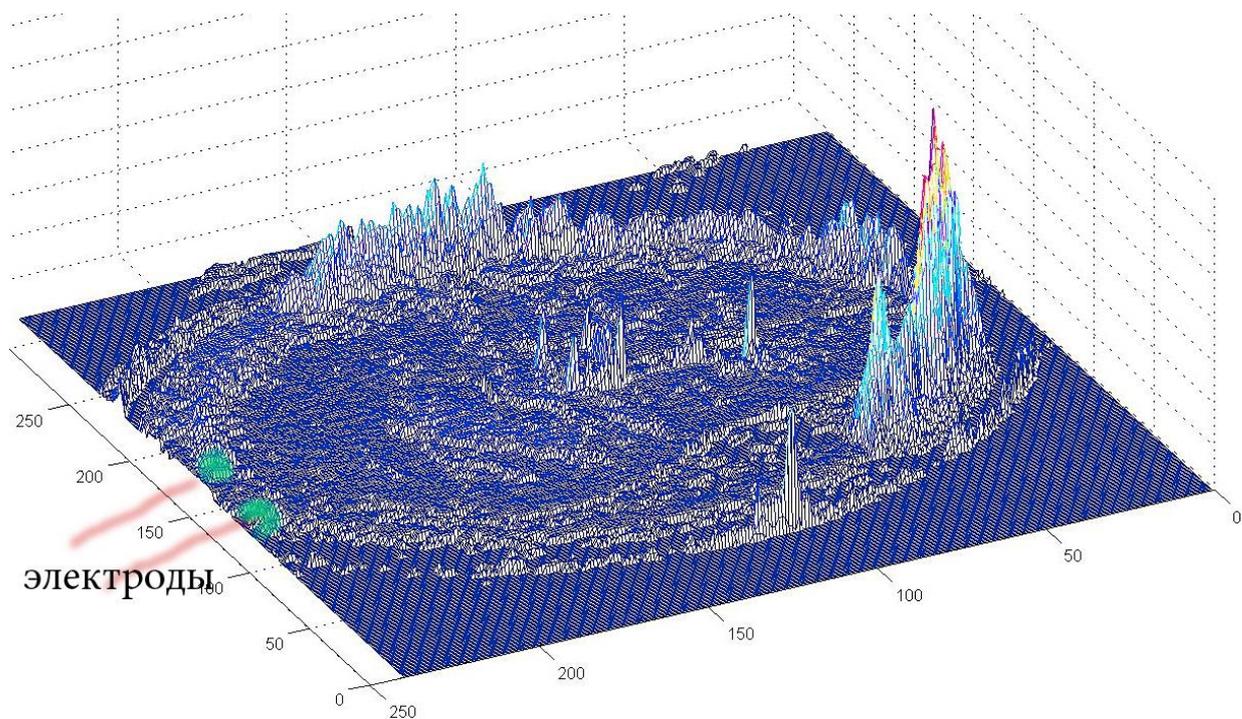


Рис. 9. Результат 1- часовой записи траекторий движения сома Clarias в поле $E = 1$ мВ/см, 1/сек.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изучен временный сдвиг порогов (ВСП) в слуховой системе дельфина после воздействия интенсивного шумового сигнала. Полученные данные показывают, что при оценке влияния шума на слуховую систему морских млекопитающих УЗЭ не может использоваться в качестве универсальной меры эффекта воздействия шума. При выработке допустимых норм воздействия шума безусловно необходимо учитывать соотношение УЗД/длительность экспозиции.

Проведены исследования по моделированию хвостовой лопасти дельфинов жестким деформируемым крылом-двигателем. Получены расчетные формулы для оценки индуктивного сопротивления, развиваемого жестким деформируемым крылом, при произвольном фазовом сдвиге между линейными и угловыми колебаниями. Формулы могут быть использованы при проектировании плавниковых двигателей.

Написана в среде MATLAB программа, позволяющая детально регистрировать и анализировать траектории движения электрочувствительных рыб в экспериментальном бассейне при воздействии электрического поля.

Поставленные задачи выполнены в полном объеме.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Белоцерковский С.М. О коэффициентах вращательных производных // Тр. ЦАГИ. 1958. Вып.725. С. 5-28.
- Белоцерковский С.М., Скрипач Б.К., Табачников В.Г. Крыло в нестационарном потоке газа. М.: Наука. 1971. 767 с.
- Романенко Е.В., 2001. Гидродинамика рыб и дельфинов. КМК, Москва, 412 с.
- Finneran JJ, Carder DA, Schlundt CE., Dear R. (2010) Growth and recovery of temporary threshold shift at 3 kHz in bottlenose dolphins: Experimental data and mathematical models. J Acoust Soc Am 127: 3256-3266.
- Finneran JJ, Schlundt CE, Branstetter B, Dear R (2007) Assessing temporary threshold shift in a bottlenose dolphin (*Tursiops truncatus*) using multiple simultaneous auditory evoked potentials. J Acoust Soc Am 122: 1249-1264.
- Mooney TA, Nachtigall PE, Breese M, Vlachos S, Au WWL (2009) Predicting temporary threshold shift in a bottlenose dolphin (*Tursiops truncatus*): The effect of noise level and duration. J Acoust Soc Am 125: 1816-1826.
- Nachtigall PE, Pawloski JL, Au WWL (2003) Temporary threshold shifts and recovery following noise exposure in the Atlantic bottlenosed dolphin (*Tursiops truncatus*). J Acoust Soc Am 113: 3425-3429.
- Popov VV, Supin AYа, Rozhnov VV, Nechaev DI, Sysuyeva EV, Klishin VO, Pletenko MG, Tarakanov MB (2013) Hearing threshold shifts and recovery after noise exposure in beluga whales, *Delphinapterus leucas*. J exp Biol. 216: 1587-1596.
- Popov VV, SupinAYа, Wang D, Wang K, Dong L, Wang S (2011) Noise-induced temporary threshold shift and recovery in Yangtze finless porpoises *Neophocaena phocaenoides asiaeorientalis*. J Acoust Soc Am 113: 3425-3429.
- Romanenko, 2002. Fish and Dolphin Swimming. Pensoft. Sofia- Moscow. 430 p.

Southall BL, Bowels AE, Ellison WT, Finneran JJ, Gentry RI, Greene ChR, Jr., Kastak D, Ketten D, Miller JH, Nachtigall PE, Richardson WJ, Thomas JA, Tyack PL. (2007) Marine mammal noise exposure criteria: Initial Scientific Recommendations. *Aquatic Mammals* 33: 411-521.