

Сведения о выполненных работах в 2020 году  
по проекту **«Комплексные экспериментально-теоретические исследования  
высокоскоростного входа в воду и движения в ней группы суперкавитирующих  
ударников при совместном пушечном старте»**,  
поддержанному Российским научным фондом  
Соглашение № 19-19-00233

Руководитель Ищенко Александр Николаевич, д-р физ.-мат. наук

Проведено сравнение расчетных результатов с экспериментальными данными, полученными в выстрелах с зарядами из порохов марки «Ирбис-охота 35», «Сунар 30-06» и «Сокол», позволившее верифицировать математическую модель для проведения параметрических исследований.

Проведены численные расчеты внутрибаллистических процессов при горении зарядов из порохов трех типов для прогнозирования условий заряжания при совместном пушечном старте группы суперкавитирующих ударников в заданном диапазоне параметров метаемых сборок и скоростей метания.

В результате проведенных параметрических экспериментально-теоретических исследований по определению условий заряжания баллистической установки калибром 30 мм подобраны и реализованы «щадящие» режимы ускорения метаемых сборок различных масс, позволяющий сохранить целостность сборки при ускорении по каналу ствола.

Получены теоретические оценки параметров движения ударников в воздухе, которые послужили основой для создания воздушного участка баллистической трассы нужной длины для соответствующих масс ударников. Сокращение длины воздушного участка траектории потребовало пересмотра конструкции ведущего устройства и уменьшения его массы. Данное требование было реализовано путем оптимизации его наружного профиля и внутренней структуры с последующим изготовлением компонентов методом послойного наплавления из SBS пластика.

Получена визуализация структуры течения вокруг двух макетов ударников в камере аэродинамической установки, оси которых параллельны и расположены на расстоянии 13 мм.

Проведено математическое моделирование процесса обтекания двух параллельно расположенных на расстоянии 13 мм ударников, показавшее количественное согласование по ударно-волновой структуре течения: расчетный угол наклона ударной волны совпадает с экспериментальным значением в пределах  $1^\circ$ .

На основе уравнений движения осесимметричного твердого тела, с учетом полученных величин аэродинамических коэффициентов, произведен расчет движения траекторий центров масс для пар ударников массами 4, 12, 26 г с начальным расстоянием между их продольными осями 13 мм.

Разработана и испытана конструкция ударника, способного сохранять целостность при входе в воду и движении в ней в режиме суперкавитации на скоростях,

превышающих скорость звука в воде. Зарегистрировано устойчивое целенаправленное движение разработанного ударника при скорости входа в воду 1518 м/с в условиях гидробаллистической трассы.

В диапазоне начальных скоростей входа в воду от 350 до 1200 м/с получено устойчивое групповое движение в воде ударников, изготовленных из сплава алюминия, стали и высокоплотного сплава ВНЖ. Определены диапазоны скоростей взаимодействия группы суперкавитирующих ударников при входе в воду без разрушения. Для ударников исследованной конической формы изготовленных из сплава алюминия пограничной скоростью является 550 м/с, превышение которой может привести к разрушению ударника при входе в воду. Для ударников из стали предельная скорость входа в воду не превышает 1000–1100 м/с. Для ударников аналогичной формы из сплава ВНЖ скорость входа в воду, при которой ударники не разрушаются, составляет порядка 1500 м/с.

Экспериментально показано, что пластичные материалы типа сплава алюминия могут формировать не симметричную каверну вследствие изгиба ударника при движении в воде.

Экспериментально получены величины отклонений траекторий стартующих одновременно одинаковых ударников. Наибольшие отклонения на расстоянии до 12 м от входа в воду развиваются при использовании относительно легких ударников, изготовленных из алюминиевого сплава. Наименьшее отклонение ударников друг от друга от начального положения достигается для тяжелых ударников из сплава ВНЖ.

Верифицирована математическая модель высокоскоростного движения группы суперкавитирующих ударников в водной среде и проведены параметрические исследования по оценке максимальных отклонений траекторий ударников разной массы при учете их взаимного влияния на начальном участке движения по гидробаллистической трассе. Показаны зависимости отклонения между траекториями ударников от пройденного в воде пути.

Впервые экспериментально продемонстрировано совместное устойчивое суперкавитирующее движение в воде двух ударников на скорости 1496 м/с, со скоростью входа в воду 1529 м/с, при этом угол расхождения их траекторий ударников не превысил  $0.04^\circ$  на дистанции 2.6 м.

На базе безразмерного параметра подобия течения – числа кавитации и полуэмпирической аппроксимации для формы тонкой осесимметричной каверны для разработанной формы ударника была определена зависимость минимальной скорости, при которой реализуется режим суперкавитирующего обтекания в зависимости от глубины залегания траектории. Интегрирование уравнения движения ударника дает его решение в виде зависимости длины пройденного ударником пути от начальной и конечной скорости движения.

Разработана методика определения параметров рассеивания ударников путем многократного повторения численного эксперимента при случайном задании факторов, влияющих на движение ударника, в результате чего формируется

статистическая выборка результатов стрельбы: дальности, бокового отклонения и высоты попадания ударника.

В результате выполнения проекта в 2020 году достигнуты следующие научные результаты по трем направлениям.

1. Проведены параметрические экспериментально-теоретические исследования по определению условий заряжания баллистической установки калибром 30 мм подобран и реализован «щадящий» режим ускорения метаемой сборки, позволяющий сохранить целостность сборки при ускорении по каналу ствола. В результате выполненного исследования определены условия заряжания баллистической установки калибром 30 мм для ускорения разработанных метаемых сборок, содержащих в себе до четырех суперкавитирующих ударников при общей массе до 150 г, и обеспечения дульной скорости в диапазоне от 400 до 1600 м/с.

2. Разработаны суперкавитирующие ударники из различных конструкционных материалов и ведущие устройства к ним для исследования влияния свойств материала на прочность при групповом входе в воду в диапазоне скоростей от 300 до 1500 м/с. Определены диапазоны скоростей неразрушающего взаимодействия группы суперкавитирующих ударников, изготовленных из сплава алюминия, стали и высокоплотного сплава ВНЖ, с поверхностью воды и при движении в воде. Изучены механизмы взаимодействия группы суперкавитирующих ударников, изготовленных из исследованных конструкционных материалов, с поверхностью воды и при движении в воде в диапазоне скоростей порядка 1500 м/с.

3. Исследовано влияние размеров кавитатора, массы и взаимного расположения ударников в метаемой сборке на формирование суперкаверны и обеспечение устойчивого движения при скоростях порядка 1500 м/с. Получены расчетные закономерности траекторных возмущений при групповом старте суперкавитирующих ударников в зависимости от глубины, начальной скорости и массогабаритных характеристик, а также целевой дальности. Получены расчетные зависимости целевого рассеяния вследствие возмущений случайного характера на начальную скорость, угол стартового направления и разновременность старта группы подводных суперкавитирующих ударников.