

# ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ ПОГРУЖЕНИЯ

**А.И. Уколов, А.С. Ваулин, М.Е. Чесноков, Е.С. Удалов**

Статья посвящена созданию и исследованию экспериментальной установки, предназначенной для моделирования гидродинамических условий погружения подводных объектов и испытаний различного подводного оборудования. Лабораторные эксперименты актуальны при разработке новых технологий и повышении надежности подводных аппаратов, позволяют выявить физико-технические особенности работы устройств, сэкономить время и финансовые затраты производства. Сконструированное оборудование содержит станцию высокого давления, подкачивающую помпу и экспериментальную камеру. Установка позволяет воспроизводить реальные условия эксплуатации устройств глубоководных аппаратов, обеспечивая широкий диапазон скоростей потока жидкости и давления. В работе описаны особенности установки, её технические характеристики и возможности. Конструкцией устройства предусмотрено дополнительное подключение освещения, передача проводного и беспроводного сигнала внутрь камеры, акустические измерения, оснащение тензорезистивными датчиками, сигнализаторами уровня и приближения. Апробация экспериментальной установки выполнена при исследовании кавитационной эрозии и разрушения образцов бетона. Проведена оценка воздействия кавитации на глубине 20–100 м, определена скорость эрозии, сила давления струи на образец. Приведены результаты экспериментов, подтверждающие эффективность предложенного подхода для оценки работоспособности и надежности подводного оборудования. Представленные данные позволяют сделать вывод о перспективности использования установки для оптимизации конструкций и повышения эксплуатационных характеристик изделий морской техники.

**Ключевые слова:** экспериментальная установка, гидростатическое давление, моделирование, гидродинамика, кавитация, измерительные приборы

## Введение

Экспериментальные исследования играют ключевую роль в развитии технологий подводного судостроения и морской техники. Современные морские условия требуют разработки надёжных методов испытаний новых конструкций и технических решений, обеспечивающих безопасность эксплуатации подводных аппаратов, судов и нефтегазового оборудования. Одной из ключевых составляющих такого процесса является создание специализированных испытательных стендов и установок, позволяющих моделировать реальные условия погружения и эксплуатации подводных объектов.

Актуальность проведения лабораторных экспериментов обусловлена необходимостью подтверждения работоспособности и долговечности морских сооружений и машин перед эксплуатацией в реаль-

ных условиях океана. Предварительные испытания обязательны при разработке подводного инструмента для очистки поверхности от обрастаний [1, 2], устройств роторного типа [3], оборудования для подводного сверления и резки [4]. Экспериментальные исследования играют ключевую роль в развитии подводных роботов, обеспечивая возможность оценки работоспособности компонентов [5–7], материалов и конструкций [8] в условиях, близких к эксплуатационным. Экспериментальная установка позволяет выявить слабые места конструкции, определить оптимальные режимы работы оборудования и обеспечить его надёжность в экстремальных условиях среды [9–11].

Цель настоящей работы заключается в разработке конструкции и экспериментальных методик универсального испытательного комплекса для проверки прочности, герметичности и функциональности

подводных устройств и оборудования. Основные задачи включают проектирование и реализацию экспериментальной установки, проведение серии тестов и получение рекомендаций по улучшению конструктивных характеристик исследуемых образцов.

Использование современных материалов и инновационных подходов позволит повысить качество проектирования подводных аппаратов и сократить сроки ввода в эксплуатацию новых изделий морского назначения. Результаты исследований будут способствовать повышению конкурентоспособности отечественной продукции на мировом рынке морской техники и укрепят технологический потенциал отечественных предприятий отрасли.

## ■ Материалы и методы

Камера для имитации гидростатического давления (рис. 1) разработана на базе креста фланцевого с пожарной подставкой (ППКФ), схематический чертеж которого показан на вставке рис. 1. Размеры и масса ППКФ представлены в табл. 1.

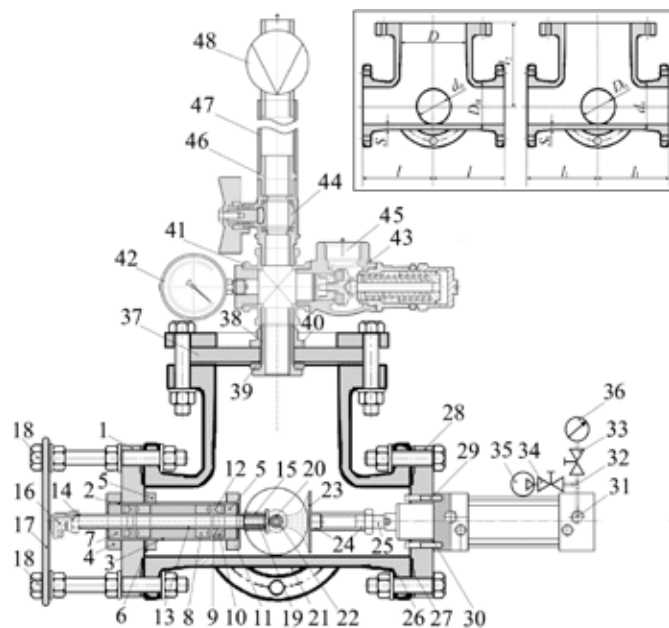


Рис. 1. Схема установки для имитации гидростатического давления; на вставке схематический чертеж креста фланцевого с пожарной подставкой

Таблица 1. Масса и габаритные показатели креста фланцевого с пожарной подставкой

Условный проход, мм		Размеры, мм								Масса, кг
$D_0$	$d_0$	$D_H$	$d_H$	S	$S_1$	$l$	$l_1$	$l_2$	$D$	
300	100	326	118	7,2	6,0	300	275	325	200	93,3

Выходы ППКФ  $D_0$  и  $D$  закрываются металлическим диском толщиной 10 мм, диаметром 370 мм и 265 мм соответственно. Металлические диски через паронитовую прокладку крепятся фланцами с помощью болтов с гайками к корпусу ППКФ. Для выходов ППКФ  $d_0$  используются фланцевые заглушки, стандартные для трубы диаметром 100 мм. На диски и заглушки монтируются дополнительные устройства: подачи воды, перемещения испытуемого устройства в камере, пневматической цилиндр, преграда потоку, держатель образцов, кран сброса воды, эндоскоп. Внешний вид установки для имитации гидростатического давления показан на рис. 2.

На рис.1 показано крепление входного патрубка в камеру высокого давления. К фланцевой заглушке (1) посредством резьбового соединения (2) крепится трубный сгон диаметром  $1 \frac{1}{4}$  дюйма (3). Длина сгона – 200 мм, длина резьбы – 55 (2) и 20 (12) мм. Сгон с наружной стороны поджимается к заглушке (1) гайкой (4) и фиксируется контргайкой (5) через резиновую прокладку (6) с использованием резьбового герметика. Внутри сгона (3) находятся фторопластовые кольца (7), которые разделяют два набора: кольцо опорное (8), манжета шевронная (9), кольцо нажимное (10). Давление сжатия шевронных манжет (9) регулируется специальными гайками (11), которые закручиваются на резьбу (2) и (12), до создания герметичности манжет и возможного перемещения трубного сгона (13) диаметром  $\frac{1}{2}$  дюйма. Длина сгона – 300 мм, длина резьбы – 10 (14) и 45 (15) мм. Сгон может перемещаться в шевронных манжетах (9) на расстояние до 50 мм. Резьба (14) служит для подсоединения углового фитинга BSP G1/2 (90°)  $DN=16$  мм (16) и шланга высокого давления диаметром 16 мм. Угловой частью фитинг (16) упирается в ограничительную металлическую пластину (17), которая крепится двумя (из восьми болтов фланцевой заглушки (1)) удлиненными симметричными болтами (18). Внешняя длина болтов фиксирует сгон (13) в промежуточных положениях. В конец сгона (13) с резьбой (15) предусмотрено крепление испытуемых механизмов (19). Разработанная конструкция ввода позволяет регулировать скорость потока воды, изменять расстояние до объекта истечения для удобной визуализации камерой (20), экспериментировать с различными соплами и насадками, подключать гидродинамический инструмент, а также обеспечивать малый поток воды для гидростатических измерений.

Видеокамера (эндоскоп) (20) установлена в трубе фланца для резервуара на задней (рис. 1) фланцевой заглушке (21) и фиксируется конической прокладкой. Труба выступает внутрь корпуса на 100 мм, что

позволяет зафиксировать на ней дополнительную кольцевидную подсветку (22). Поток воды из трубы (13) направлен на преграду потоку (23), которая с помощью резьбового соединения (24) крепится на шток пневмоцилиндра (25). На месте преграды (23) может устанавливаться гидрофон для измерения акустического сигнала, тензорезистивный датчик, сигнализатор уровня и приближения. Проводной сигнал выводится через проделанный паз в корпусе фланца (26) под паронитовой прокладкой (27) с использованием герметика. Если датчик обладает беспроводным сигналом, выполняется соединение через Wi-Fi или Bluetooth в приложении с помощью мобильного устройства.

С противоположной стороны входного патрубка (13) на рис.1 показана фланцевая заглушка (28) с смонтированным пневматическим цилиндром. Крепление к заглушке выполнено четырьмя болтами М6х1 (29), для которых предусмотрено отверстие с резьбой в корпусе используемого пневмоцилиндра марки SC 125х32. Герметизация обеспечивается кольцевой резиновой прокладкой (30). Пневмоцилиндр используется в экспериментах определения силы удара и отдачи струи на испытуемый объект, а также в испытаниях на кавитационную эрозию. Шток пневмоцилиндра дополнительно оборудуется держателем преграды потоку, крепления образцов или измерительных датчиков. К выходу пневмоцилиндра



Рис. 2. Внешний вид установки для имитации гидростатического давления

присоединяется тройник с системой клапанов, через которые может нагнетаться воздух от компрессора, сбрасываться и измеряться давление по цифровому или аналитическому манометру.

Для измерения силы к выходу пневмоцилиндра (31) с помощью резьбового соединения подключается тройник (32), клапаны (33) и (34), компрессор (35) и манометр (36) для измерения давления в цилиндре. Клапаны (33) и (34) работают в трех режимах: пропускают воздух, закрывают канал и сбрасывают воздух в атмосферу. В первом варианте эксперимента клапан (33) открыт, а (34) закрыт. После запуска установки поток воды, оказывая динамическое давление на испытуемый образец (23), сжимает воздух в пневмоцилиндре, что фиксируется манометром. Перемещающая трубный сгон (13) с соплом в манжетах (рис.1), определяют показания манометра на различных расстояниях от преграды. Сила удара или отдачи рассчитывается по формуле:

$$F = \frac{\pi P_M D_{ц}^2}{4}, \quad (1)$$

где  $P_M$  – давление по манометру (Па),  $D_{ц} = 0,032$  м – диаметр поршня пневмоцилиндра.

Во втором варианте эксперимента открыты оба клапана (33) и (34). Входной патрубок располагается на постоянном расстоянии, а перемещается испытуемое устройство. После запуска установки компрессор (35) закачивает воздух в пневмоцилиндр и выдвигает его шток. Давление воздуха измеряется манометром (36), а сила рассчитывается по формуле 1. Использование в эксперименте компрессора позволяет приблизить преграду вплотную к противоположной стороне. Таким образом, конструкция позволяет исследовать подводное сопряжение частей устройства, определить силу взаимодействия при работе режущего, сверлильного или сварочного инструмента, измерить силу отдачи гидродинамических подводных машин, наблюдать поведение подводных аппаратов в динамике.

На рис.1 также показана гидравлическая система, обеспечивающая выход воды из камеры высокого давления, смонтированная на металлическом диске (37) диаметром 265 мм, который закрывает выход  $D$  в ППКФ. В диске (37) сделано отверстие, в которое вставлен переходник с фланцем для резервуара (38) диаметром  $1 \frac{1}{4}$  дюйма. Переходник через резиновую прокладку (39) герметично крепится при помощи гайки (40) к корпусу диска (37). На резьбу переходника накручивается трубный крест (41) диаметром  $1 \frac{1}{4}$ . К первому выходу трубного креста (41) через переходник на  $\frac{1}{2}$  дюйма подсоединяется манометр (42) для измерения давления в камере. Ко второму

выходу подсоединяется регулятор давления (43) обводной «байпасной» линии. Регулятор давления (43) откалиброван на давление, необходимое для имитации гидростатического давления в камере. Таким образом, при закрытии крана (44) пружина регулятора давления открывает выход (45) и выполняет сброс воды, поддерживая его постоянным. Когда давление в камере менее установленного на регуляторе, вода, через приоткрытый шаровый кран (44) и переходник (46), попадает в гибкий шланг (47). На конце гибкого шланга (47) расположен расходомер (48), после которого вода сбрасывается обратно в море.

Испытательный стенд изготовлен по разработанной конструкции, описанной выше. Общий вид испытательного стенда показан на рис.2. Основным элементом стенда является камера высокого давления (1), представляющая крест фланцевый с подставкой под пожарный гидрант (ППКФ). К камере с одной стороны крепится пневматический цилиндр (2), система клапанов (3), тройник (4) и компрессор (5). Электропитание компрессора осуществляется от аккумулятора двигателя внутреннего сгорания установки высокого давления через штекер (6). Давление воздуха в испытаниях на силу удара и отдачи контролируется по двум манометрам (7, 8).

Ответвление ППКФ с большим диаметром содержит видеокамеру (эндоскоп) с монитором и блоком питания (9). Противоположная сторона закрыта (10) металлическим диском, который служит экраном для наблюдения процессов в камере. Сверху камеры (1) крепится тройник (11), к которому присоединены манометр (12) контроля давления в камере и регулятор давления байпасной линии (13) со шлангом сброса воды (14). Далее по трубопроводу находится шаровый кран регулировки давления в камере (15) и шланг основного выхода воды из камеры (16), в конце которого размещается расходомер.

Подача воды в камеру (1) от плунжерного насоса осуществляется через трубу DN16, вставленную в шевронные манжеты, по шлангу высокого давления и фитингу РВД марки DN16 BSP ½ дюйма с углом 90°. Вход шланга и устройство фиксации фитинга расположены с обратной стороны установки и не показаны на рис. 2.

## ■ Экспериментальная установка и результаты

Экспериментальная проверка работы установки для моделирования гидродинамических условий выполнена на морской базе ФГБОУ ВО «Керченский государственный морской технологический универ-

ситет» по адресу: Республика Крым, г. Керчь, ул. Маяка, д. 2-Б. Координаты: 45,3531 с.ш., 36,4743 в.д. Расположение на общем плане города Керчи и подробная спутниковая карта морской базы с расположением пирса и рабочих помещений показана в увеличенном масштабе на рис. 3, а, б.

Экспериментальная установка (рис. 4) состоит из камеры высокого давления с навесным оборудованием и измерительными приборами (1), установки высокого давления (2), видеокамеры (эндоскоп) (3), мотопомпы (4).

В основу установки высокого давления взят трехплунжерный насос с керамическими плунжерами Hawk ХХТ7015IR (рис. 4 (2)). Насос серии ХХТ7015IR может работать при максимальном давлении 150 бар, расходе жидкости до 70 л/мин и температуре воды до 65°C. Его компактная конструкция и хорошая производительность – главные достоинства этого насоса. Плунжерный насос создает поток воды, а давление формируется благодаря соплам или другим устройствам выхода потока. Благодаря широкому диапазону гидродинамических параметров насос позволяет моделировать необходимые подводные условия: обтекаемость образцов на различных скоростях, подключение гидравлического инструмента, испытания на кавитационную эрозию материала. Рабочее давление может отличаться от номинального в пределах от -10% до +5%. При работе насоса используется холодная и чистая пресная или морская вода. После применения морской воды насос промывается пресной из рабочей емкости.

Для создания высокого давления установка комплектуется бензиновым приводом Loncin LC2V90FD D36.5 20A (рис. 4 (2)). Выбор привода обусловлен потребительскими характеристиками насоса. Его задача обеспечить заданную мощность и частоту оборотов плунжеров. Кроме того, он обладает определенным запасом мощности для подключения дополнительного оборудования.

Эта модель представляет собой четырехтактный бензиновый двигатель с горизонтальным коленвалом. Один из самых мощных двигателей Loncin в линейке двигателей общего назначения. Оборудован встроенной катушкой освещения до 20 А и выпрямителем такой же мощности, имеет возможность подключения внешнего электрического оборудования мощностью до 240 Вт. Используется в качестве источника движущей силы на генераторах в аппаратах высокого давления, в мотопомпах, в минитракторах, вездеходах и прочей технике. Основные достоинства – высокая мощность, низкая вибрация при работе, экономичность. Для удобства эксплуатации

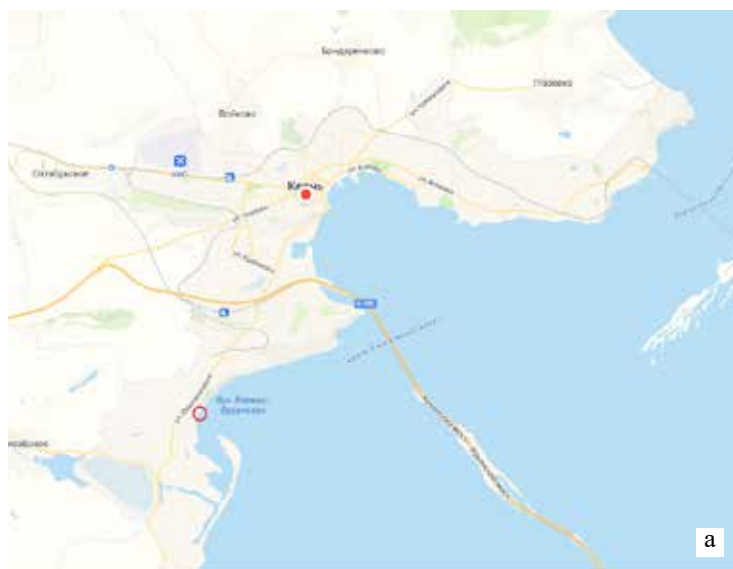


Рис. 3. Морская база

двигатель оснащен рычагом топливного крана, рычагом воздушной заслонки, рычагом газа, выключателем зажигания.

Соединение двигателя с насосом выполнено при помощи понижающего редуктора В31 для двигателей внутреннего сгорания. Выбор данного редуктора обусловлен частотой и мощностью бензинового двигателя, а также присоединительными размерами и конструктивным исполнением вала. Редуктор рекомендуется производителем при приобретении двигателя.

Все вышеперечисленные комплектующие напорной установки были смонтированы на металлической раме на 4 колесах. Кроме перечисленных компонентов в состав установки входят: водяной фильтр, аккумулятор, шланг высокого давления диаметром 16 мм, комплект переходников.



Рис. 4. Общий вид установки

Плунжерный насос не является самовсасывающим. На вход насоса вода подается от подкачивающей мотопомпы под давлением не менее 2 атм с расходом не менее 70 л/мин. Такой режим работы обеспечивает мотопомпа LIFAN 50ZB60-4,8QT (рис. 4 (4)).

Регулировка давления производится при помощи регулировочного клапана VB 85Rv 85 л/мин 310 бар, расположенного на установке высокого давления. Выбор регулятора давления обусловлен максимальным давлением и расходом насоса. Ресурс регулятора позволит контролировать возможный перегруз гидродинамической системы. Регулировочный, перепускной клапан (байпас, by-pass) с микропереключателем (датчиком давления, totalstop) специально предназначен для насосов высокого давления. Он регулирует давление посредством поворота ручки, винта и автоматически перепускает жидкость из нагнетательной магистрали насоса во всасывающую при превышении установленного давления, например, при закрытии магистрали высокого давления пистолетом или краном.

Для наблюдения и записи экспериментальных данных используется подводная видеокамера, изготовленная ООО «Алга». В комплектацию видеокамеры входят: 7-дюймовый монитор с записью HD качества и звука, прочный провод диаметром 6,3 мм (максимально допустимая сила натяжения 420 Н, температура использования до минус 20 °С), аккумулятор литий-ионный с цифровым дисплеем остатка заряда с емкостью 4,7 ампер-часа (время работы до 5,5 часов), прочный эндоскоп диаметром 33 мм, длиной 126 мм, разрешением 2 мегапикселя (угол обзора 110°), со светодиодной подсветкой и погружением под воду до 210 м (21 атм), карта для записи на 32 Гб, зарядное устройство и сумка для транспортировки и хранения камеры.

Таким образом, сконструированная установка позволяет выполнять исследования при имитации погружения до 200 м, моделируя

различные гидродинамические условия испытаний, осуществлять видео- и аудиозапись эксперимента, координировать перемещение непосредственно в процессе проверки объектов, обладает несколькими уровнями защиты от возможных гидравлических аварий.

Результаты, полученные на настоящий момент использования установки для имитации гидростатического давления, связаны с исследованиями кавитационной эрозии и разрушения образцов бетона. Данный эксперимент позволяет оценить качество сопел-кавитаторов подводного инструмента для очистки поверхности и спрогнозировать кавитационную стойкость бетонных конструкций. Испытания выполнены на глубине до 100 м. Для анализа разрушительных качеств кавитации в камере на шток пневмоцилиндра ((25) на рис. 1) устанавливались образцы бетона, изготовленные в формах, подобных держателю, из раствора цемента марки М 400 и песка в соотношении 1:1 (рис. 5, а), 1:2 (рис. 5, б), 1:3 (рис. 5, в).

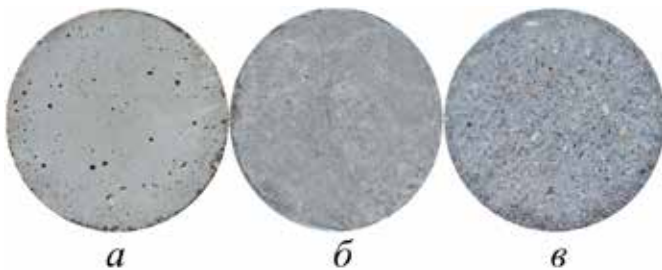


Рис. 5. Образцы бетона: цемент марки М 400 в соотношении с песком: а – 1:1, б – 1:2, в – 1:3

До запуска плунжерного насоса образцы бетона помещались в держатель (рис. 6, а), который размещен на штоке пневмоцилиндра. После запуска насоса в камере высокого давления создается  $P_{\text{прот}} = 10$  атм, и образец с помощью компрессора (5) (рис. 2) перемещается ближе к соплу-кавитатору (рис. 6, б, в). В таком положении образец выдерживался 30–40 с. После этого насос выключался, образец извлекался из держателя и по потере массы рассчитывалась скорость кавитационной эрозии.

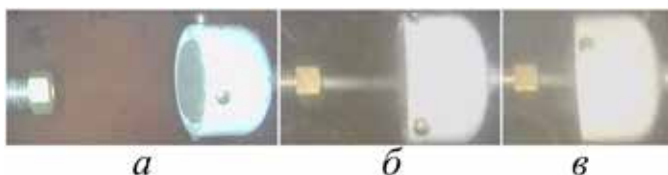


Рис. 6. Этапы подводного разрушения бетона: до (а), после включения насоса (б) и на оптимальном расстоянии очистки (в). Давление в камере 10 атм

Структурно образцы бетона разрушаются различными механизмами. Если соотношение цемента и песка 1:3, то образец разрушается на мелкодисперсную среду на этапе приближения образца к инструменту. Образец бетона 1:2 (рис. 7, а) разрушается после 40 с воздействия, но в камере высокого давления можно обнаружить крупные фрагменты обломков бетона. Образец бетона, приготовленный в соотношении цемента и песка 1:1, выдерживает 40 с кавитационного воздействия. В образце появляется углубление из-за разрушений бетона, которое позволяет определить скорость кавитационной эрозии.

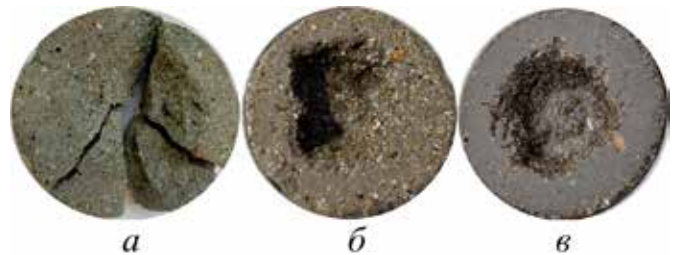


Рис. 7. Кавитационная эрозия бетона: цемент марки М 400 в соотношении с песком 1:2 (а), 1:1 – (б) и (в)

Многочисленный анализ экспериментальных данных разработанного сопла в испытательной установке позволил оценить скорость эрозии твердых образцов при кавитационном воздействии. Для образцов бетона 1:2 и 1:1 скорость эрозии составила 15 и 9 г/мин соответственно.

Одновременно с эрозийными испытаниями выполнено измерение силы давления на образец. Входное давление во всех измерениях  $P_{\text{вх}} = 150$  атм. Противодавление в камере варьировалось:  $P_{\text{прот}} = 2-10$  атм, моделируя погружение от 20 до 100 м. На рис. 8 показаны результаты измерения силы удара  $F$  в зависимости от координаты  $x$  по оси струи. Начало координат графика (рис. 8) совпадает с начальным сечением струи. На зависимости  $F=f(x)$  наблюдается максимум, который возрастает с увеличением противодавления и сдвигается в сторону больших координат  $x$ . До точки экстремума зависимость  $F=f(x)$  близка к линейной. Причем сила возрастает при удалении от начального сечения сопла. Это вызвано тем, что измерения начинались в конце ядра кавитационного «факела» и заканчивались в области без кавитации. Кавитация создает разрежение в объемном потоке и снижает динамическое воздействие струи. По мере удаления от зоны кавитации концентрация кавитационных пузырьков снижается и динамическое давление возрастает, достигая своего максимума в части струи, где кавитация отсутствует. Дальнейший спад силы обусловлен снижением динамического давле-

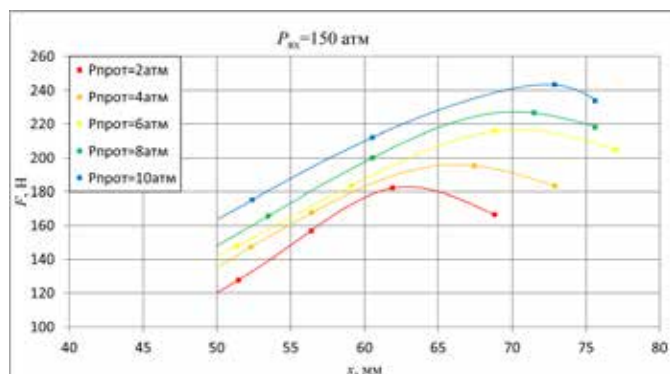


Рис. 8. Зависимость силы удара  $F$  кавитирующей струи о преграду потока от координаты  $x$  по оси струи

ния затопленной струи с увеличением расстояния и с явлением кавитации не связан.

Приведенные в данной работе результаты показывают основные возможности сконструированной установки для исследований под водой. В целом установка позволяет решать значительное количество экспериментальных задач для предварительных испытаний подводного оборудования и элементов робототехники. Установкой предусмотрены дополнительное подключение освещения, передача проводного и беспроводного сигнала внутрь камеры, акустические измерения, оснащение тензорезистивными датчиками, сигнализаторами уровня и приближения.

## Выводы

Разработана установка, позволяющая имитировать гидростатическое давление при испытаниях различного типа устройств. Описаны методики измерений и функциональные возможности установки. Сконструировано оборудование, включающее

станцию высокого давления, подкачивающую помпу и экспериментальную камеру, позволяющее осуществить полный цикл измерений. Показана апробация оборудования на испытаниях кавитационного инструмента для очистки поверхности. В процессе экспериментов осуществлены: визуализация всех этапов измерений, манипуляция с объектами внутри камеры, измерение давления, силы, расхода жидкости.

Экспериментальная установка для испытаний подводных технических устройств продемонстрировала свою эффективность и надежность в процессе тестирования ряда образцов подводной техники. Предложенная технология может применяться для измерения характеристик гидродинамического сопротивления, устойчивости и маневренности исследуемых объектов, позволяет проводить всестороннее тестирование оборудования в широком диапазоне эксплуатационных режимов. Использование современных технологий и оборудования повышает информативность и объективность оценки технических показателей испытуемых изделий.

Для дальнейшего совершенствования установки развивается сотрудничество с научно-исследовательскими и конструкторскими организациями в области оптимизации механизмов и улучшения функциональных возможностей испытательной установки, разрабатываются новые методики измерения и анализа данных, направленные на повышение точности и эффективности испытаний.

Таким образом, представленная экспериментальная установка является перспективной платформой для дальнейших исследований и разработок в области подводных технологий, а предлагаемые направления сотрудничества позволят значительно расширить её потенциал и повысить уровень научных достижений.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Кульчин Ю.Н., Быканова А.Ю., Гой В.А., Костенко В.В., Никитин А.И., Субботин Е.П. Результаты разработки подводного робототехнического комплекса инспектирования и лазерной очистки корпуса судна от биообрастания // Подводные исследования и робототехника. 2025. № 4 (54). С. 4–21.
2. Ермолов И.Л. Применение роботов вертикального перемещения для очистккорпусов судов от обрастаний // Подводные исследования и робототехника. 2024. №3 (49). С. 76–82.
3. Патент 2764930 Российская Федерация, МПК В63В 59/08 Устройство для гидродинамической очистки поверхностей под водой: № 202113048: заявл. 20.10.2021: опубл. 24.01.2022 / Уколов А.И., Родионов В.П., Серёгин С.С., Масюткин Е.П.; заявитель и патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью «КАВИПАУЭР». 7 с.: ил.
4. Kim I., Lee J., Hyun D., Joo S., Ha J. Error detection in underwater laser cutting for nuclear facility dismantlement using hydrophone and AI techniques // Annals of Nuclear Energy. 2025. Vol. 222. P. 11590.
5. Герасимов В.А., Комлев А.В., Филоженко А.Ю. Исследование и разработка бесконтактных электромагнитов для средств подводной робототехники // Подводные исследования и робототехника. 2023. №. 4 (46). С. 4–15.
6. Fu T., Wang B., Liu Y., Ai R., Liu J., Wang C., Li D. Design, perception, planning and control for underwater cleaning robotics: Progress, challenges and trends // Journal of Ocean Engineering and Science. 2025. Vol. 24. P. e00715.
7. Hasib Sh.A., Gulzar M.M., Oishy S.R., Maaruf M., Habib S., Shakoor A. An investigation of innovative strategies in underwater soft robotics // Engineering Science and Technology, an International Journal. 2025. Vol. 70. P. 102123.

8. Горшонков А.С., Костылев К.А., Салин М.Б., Усачева И.А. Акустическая диагностика состояния конструкции при воздействии гидростатического давления // Подводные исследования и робототехника. 2025. № 4 (54). С. 51–62.
9. Красильников А. В. Поворотный гидродинамический стенд методика оценки его габаритных характеристик // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2012. Т. 55, № 5. С. 24–28.
10. Колесник А.Н., Босин А.А., Колесник О.Н., Янченко Е.А. Испытательный стенд для грунтовых пробоотборников // Подводные исследования и робототехника. 2024. № 4 (50). С. 85–88.
11. Валетов В.А., Красильников А.В. Имитация гидростатического давления при испытаниях пусковых устройств автономных необитаемых подводных аппаратов в цеховых условиях // Научно-технический вестник Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики. 2010. № 5 (69). С. 75–80.

## Справка об авторах:

**УКОЛОВ Алексей Иванович**, к. ф-м н., доцент кафедры математики, физики и информатики

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Керченский государственный морской технологический университет»

**Адрес места работы:** Россия, 298309, Республика Крым, г. Керчь, ул. Орджоникидзе, 82

**Область научных интересов:** механика жидкости и газов, кавитация, подводный инструмент

**E-mail:** ukolov\_aleksei@mail.ru

**Тел.:** +79787572676

**ORCID:** 0000-0002-2467-3379

**SPIN-код:** 2755-5856

**AuthorID:** 886648

**ВАУЛИН Александр Сергеевич**, главный специалист

Общество с ограниченной ответственностью «Газпром 335»

**Адрес места работы:** Россия, 196210, г. Санкт-петербург, ул. Внуковская, д. 2

**Область научных интересов:** подводная робототехника, автономные и телеуправляемые аппараты, подводные газотранспортные системы

**E-mail:** inf@gazprom335.ru

**Тел.:** +78124550155

**ЧЕСНОКОВ Михаил Евгеньевич**, главный специалист

Общество с ограниченной ответственностью «Газпром 335»

**Адрес места работы:** Россия, 196210, г. Санкт-петербург, ул. Внуковская, д. 2

**Область научных интересов:** робототехнические платформы, автономные и телеуправляемые аппараты, подводные газотранспортные системы

**E-mail:** inf@gazprom335.ru

**Тел.:** +78124550155

**УДАЛОВ Евгений Сергеевич**, главный специалист

Общество с ограниченной ответственностью «ГАЗПРОМ 335»

**Адрес места работы:** Россия, 196210, г. Санкт-петербург, ул. Внуковская, д. 2

**Область научных интересов:** подводные манипуляторы, системы управления роботами, приборы для измерения, тестирования и навигации

**E-mail:** inf@gazprom335.ru

**Тел.:** +78124550155



# EXPERIMENTAL FACILITY FOR SIMULATING HYDRODYNAMIC CONDITIONS OF SUBMERGING

**A.I. Ukolov, A.S. Vaulin, M.E. Chesnokov, E.S. Udalov**

The article is devoted to the creation and study of an experimental facility designed for simulating hydrodynamic conditions of submerging underwater objects and testing various underwater equipment. Laboratory experiments are relevant in developing new technologies and improving reliability of underwater vehicles, allowing identification of physical and technical features of operation of underwater devices while saving time and financial resources. The constructed equipment includes a high-pressure station, booster pump, and experimental chamber. This setup enables reproduction of real operating conditions for deep-sea vehicles by providing a wide range of fluid flow velocities and pressures. The paper describes specifics of the installation, its technical characteristics, and capabilities. Additional features include connection of lighting, wired and wireless signal transmission into the chamber, acoustic measurements, as well as outfitting with strain gauge sensors, level indicators, and proximity alarms. The experimental setup was tested during a study of cavitation erosion and destruction of concrete samples. An assessment of the impact of cavitation at a depth of 20-100 m was made, the erosion rate and the force of jet pressure on the sample were determined. Results of experiments confirming effectiveness of this approach for evaluating functionality and reliability of underwater equipment have been presented. These data allow concluding that use of such facilities holds promise for optimizing designs and enhancing operational characteristics of marine technology products.

**Keywords:** experimental facility, hydrostatic pressure, simulation, hydrodynamics, cavitation, measuring instruments

## References

1. Kul'chin Yu.N., Bykanova A.Yu., Goy V.A., Kostenko V.V., Nikitin A.I., Subbotin E.P. Rezul'taty razrabotki podvodnogo robototekhnicheskogo kompleksa inspektirovaniya i lazernoy ochildki korpusa sudna ot bioobrastaniya. *Podvodnyye issledovaniya i robototekhnika*. 2025. No. 4 (54). P. 4–21.
2. Yermolov I.L. Primeneniye robotov vertikal'nogo peremeshcheniya dlya ochildki korpusov sudov ot obrastaniya. *Podvodnyye issledovaniya i robototekhnika*. 2024. No.3 (49). P. 76–82.
3. Ukolov A.I., Rodionov V.P., Serëgin S.S., Masyutkin E.P. Ustroystvo dlya gidrodinamicheskoy ochildki poverkhnostey pod vodoy. RF Patent No 2764930, Bull. No. 3, dated January 24, 2021.
4. Kim I., Lee J., Hyun D., Joo S., Ha J. Error detection in underwater laser cutting for nuclear facility dismantlement using hydrophone and AI techniques. *Annals of Nuclear Energy*. 2025. Vol. 222. P. 11590.
5. Gerasimov V.A., Komlev A.V., Filozhenko A.YU. Issledovaniye i razrabotka beskontaknykh elektromagnitov dlya sredstv podvodnoy robototekhniki. *Podvodnyye issledovaniya i robototekhnika*. 2023. No. 4 (46). P. 4–15.
6. Fu T., Wang B., Liu Y., Ai R., Liu J., Wang C., Li D. Design, perception, planning and control for underwater cleaning robotics: Progress, challenges and trends. *Journal of Ocean Engineering and Science*. 2025. Vol. 24. P. e00715.
7. Hasib Sh.A., Gulzar M.M., Oishy S.R., Maaruf M., Habib S., Sha-koor A. An investigation of innovative strategies in underwater soft robotics. *Engineering Science and Technology, an International Journal*. 2025. Vol. 70. P. 102123.
8. Gorshonkov A.S., Kostylev K.A., Salin M.B., Usacheva I.A. Akusticheskaya diagnostika sostoyaniya konstruktsii pri vozdeystvii gidrostaticheskogo davleniya. *Podvodnyye issledovaniya i robototekhnika*. 2025. No. 4 (54). P. 51–62.
9. Krasil'nikov A. V. Povоротnyy gidrodinamicheskiiy stend i metoda otsenki yego gabaritnykh kharakteristik. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Priborostroyeniye*. 2012. Vol. 55. No. 5. P. 24–28.
10. Kolesnik A.N., Bosin A.A., Kolesnik O.N., Yanchenko E.A. Ispytatel'nyy stend dlya gruntovykh probotoornikov. *Podvodnyye issledovaniya i robototekhnika*. 2024. No. 4 (50). P. 85–88.
11. Valetov V.A., Krasil'nikov A.V. Imitatsiya gidrostaticheskogo davleniya pri ispytaniyakh puskovykh ustroystv avtonomnykh neobitayemykh podvodnykh apparatov v tsekhovykh usloviyakh. *Nauchno-tekhnicheskiiy vestnik Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo universiteta informatsionnykh tekhnologiy, mekhaniki i optiki*. 2010. No. 5 (69). P. 75–80.

### Recommended citation:

Ukolov A.I., Vaulin A.S., Chesnokov M.E., Udalov E.S. EXPERIMENTAL FACILITY FOR SIMULATING HYDRODYNAMIC CONDITIONS OF SUBMERGING. *UNDERWATER INVESTIGATIONS AND ROBOTICS*. 2026. No. 2 (56). P. 70–79. DOI: 10.37102/1992-4429\_2026\_56\_02\_07. EDN: WGGFKU.

## Information about the authors

**Full name:** Ukolov Alexey Ivanovich

**Academic degree, academic title, position:** Ph.D., Associate Professor of the Department of Mathematics, Physics and Computer Science

**Name of institution:** Federal state budgetary educational institution of higher education «Kerch State Maritime Technological University»

**Work address:** Russia, 298309, Republic of Crimea, Kerch, st. Ordzhonikidze, 82

**Research Interests:** fluid and gas mechanics, cavitation, underwater instrumentation

**E-mail:** ukolov\_aleksei@mail.ru

**Phone:** +79787572676

**ORCID:** 0000-0002-2467-3379

**SPIN-код:** 2755-5856, **AuthorID:** 886648

**Full name:** Vaulin Alexander Sergeevich

**Academic degree, academic title, position:** chief specialist

**Name of institution:** Limited Liability Company «Gazprom» 335.

**Work address:** Russia, 196210, St. Petersburg, st. Vnukovskaya, 2

**Research Interests:** underwater robotics, autonomous and remotely operated vehicles, underwater gas transportation systems

**E-mail:** inf@gazprom335.ru

**Phone:** +78124550155

**Full name:** Chesnokov Mikhail Evgenievich

**Academic degree, academic title, position:** chief specialist

**Name of institution:** Limited Liability Company «Gazprom» 335.

**Work address:** Russia, 196210, St. Petersburg, st. Vnukovskaya, 2

**Research Interests:** robotic platforms, autonomous and remotely operated vehicles, underwater gas transportation systems

**E-mail:** inf@gazprom335.ru

**Phone:** +78124550155

**Full name:** Udalov Evgeny Sergeevich

**Academic degree, academic title, position:** chief specialist

**Name of institution:** Limited Liability Company «Gazprom» 335.

**Work address:** Russia, 196210, St. Petersburg, st. Vnukovskaya, 2

**Research Interests:** underwater manipulators, robot control systems, measuring, testing, and navigation instruments

**E-mail:** inf@gazprom335.ru

**Phone:** +78124550155

