

На правах рукописи



Басалаев Сергей Александрович

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ГОРЕНИЯ УНИТАРНЫХ ТВЕРДЫХ
ТОПЛИВ И ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ
УСТРОЙСТВ, ПОГРУЖЕННЫХ В ЖИДКОСТЬ**

Специальности 01.04.17 – Химическая физика, горение и взрыв,
физика экстремальных состояний вещества
01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Томск – 2012

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет» на кафедре математической физики физико-технического факультета и в отделе газовой динамики и физики взрыва НИИ ПММ ТГУ

Научные руководители: доктор технических наук,
профессор Барсуков Виталий Дементьевич;
доктор физико-математических наук,
ст. н. с. Голдаев Сергей Васильевич

Официальные оппоненты: Субботин Александр Николаевич,
доктор физико-математических наук,
профессор кафедры парогенераторостроения и
парогенераторных установок Национального
исследовательского Томского политехнического
университета

Трофимов Вячеслав Федорович
доктор физико-математических наук,
профессор кафедры прикладной аэромеханики
Национального исследовательского Томского
государственного университета

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
профессионального образования "Ижевский
государственный технический университет имени
М.Т. Калашникова"

Защита состоится «28» декабря 2012 г. в 14⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 212.269.13 при федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: 634050, г. Томск, ул. Усова, 7, корпус 8.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Национального исследовательского Томского политехнического университета по адресу: 634050, г. Томск, ул. Белинского, 55.

Автореферат разослан « » ноября 2012 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета



А.С. Матвеев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. При проведении подводно-технических и аварийно-спасательных работ используются разнообразные средства на основе твердотопливных газогенераторов. Освоение Мирового океана, разработка морских нефтяных и газовых месторождений, расширение технологических возможностей аппаратов по термогазохимическому воздействию на жидкости делает актуальным исследования по совершенствованию подобных устройств и методической базы по их созданию.

В настоящее время разработка и совершенствование устройств на основе унитарного твердого топлива (УТТ) для работы в жидкой среде интенсивно ведется в России, США, Франции и ряде других стран. Известны методики и экспериментальные результаты по функционированию твердотопливных газогенераторов в жидкой среде опубликованные в работах сотрудников ИХФ, Московского химико-технологического университета, Ижевского Казанского и Пермского государственных технических университетов и др.

Однако во всех вышеперечисленных организациях рассматриваются твердотопливные газогенераторы с прочным металлическим или пластмассовым корпусами и с герметичными схемами запуска.

В настоящей диссертации исследуются открытые твердотопливные газогенераторы (бескорпусные) с разгруженными от гидростатического давления элементами. Запуск их производится непосредственно в водной среде, за счет барботажа через которую охлаждаются продукты сгорания. В результате уменьшается пассивный вес и стоимость открытых газогенераторов.

Экспериментальный метод решения физико-математического моделирования гидродинамических процессов, сопровождающих работу устройств на основе унитарных твердых топлив является трудоемким. Поэтому комплексный анализ таких процессов на основе вычислительного эксперимента представляется актуальной задачей, как в экологическом отношении, так и в плане безопасной эксплуатации устройств.

Целью диссертационной работы является моделирование горения УТТ и гидродинамических процессов устройств, погруженных в жидкость.

Положения, выносимые на защиту диссертационной работы:

1. Обобщённая модель зажигания УТТ под водой плоской спиралью накаливания с учетом зависимости удельного электрического сопротивления от температуры.
2. Результаты экспериментальных испытаний влияния перегрузки на скорость горения УТТ.
3. Результаты лабораторных испытаний подводного открытого газогенератора (ОГ) с многократным запуском и остановом.
4. Обобщённая методика создания регулируемой подъемной силы и всплытия понтона с грузом.
5. Методики интерпретации визуальных данных процесса горения УТТ в жидкой среде при перегрузках и функционирования малогабаритного подъемного устройства.

6. Анализ эффективности модернизированных устройств на основе ОГ для проведения подводно-технических и аварийно-спасательных работ.

Новизна результатов проведенных исследований.

1. Установлено, что при зажигании УТТ спиралью накаливания (СН) в жидкой среде для металлов, у которых температурный коэффициент сопротивления близок или меньше, чем у нихрома можно не учитывать его влияние.
2. Экспериментально доказана возможность многократного запуска и прекращения работы ОГ под водой.
3. Расчетным путем установлено, что в математической модели наполнения эластичных оболочек сферической формы допустимо не учитывать инерционные свойства жидкости.
4. Вычислительным экспериментом подтверждена возможность регулируемого всплытия понтона с грузом.
5. Экспериментально установлено, что при увеличении положительной перегрузки в диапазоне (1...255) g скорость горения УТТ возрастает в (1...2,5) раза.

Практическая значимость диссертации и использование полученных результатов.

1. Разработанная обобщенная методика прогнозирования характеристик устройства с регулируемой подъемной силой может быть использована в организациях, занимающихся проектированием и эксплуатацией понтонов.
2. Предложено устройство для пожаротушения с импульсной подачей жидкости, позволяющее снизить расход воды.
3. Установки с визуализацией процесса многократного запуска и прекращения функционирования ОГ, всплытия эластичного понтона с грузом могут использоваться в учебных курсах по теории внутрикамерных процессов в высокоэнергетических системах и гидромеханике.

Результаты исследований по теме диссертации получены, при проведении работ по грантам РФФИ (проект № 09-03-00054-а, проект № 05-08-18120-а).

Достоверность научных результатов и выводов подтверждается сопоставлением расчетных данных с опытными и апробированными результатами научных исследований других ученых.

Публикации. По материалам диссертации опубликована 21 работа, в том числе 5 статей в журналах, рекомендованных ВАК для публикации научных результатов диссертаций на соискание ученых степеней кандидатов и докторов наук: «Химическая физика и мезоскопия», «Известия ВУЗов. Физика» и «Пожарная безопасность». Соискатель является соавтором 3 патентов РФ на изобретение. Список публикаций представлен в конце автореферата.

Диссертация изложена на 156 страницах машинописного текста, содержит 49 рисунков, 8 таблиц, библиография включает 147 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность и практическая значимость выбранного направления исследований. Сформулированы и обоснованы цели и задачи исследований, новизна полученных результатов, выносимых на защиту.

В первой главе на основе анализа литературных данных обоснованы пути решения поставленных задач.

Во второй главе приводится физико-математическое моделирование работы систем запуска ОГ.

В Научно-исследовательском институте прикладной математики и механики Томского госуниверситета (НИИ ПММ ТГУ) давно ведутся работы по исследованию функционирования устройств под водой на основе ОГ. Схема одного из вариантов которого, предназначенного для наполнения понтонов, показана на рис. 1. В шашке УТТ 1 выточен полузамкнутый канал 2, в верхней стенке которого установлен электровоспламенитель в виде СН. Предполагается, что участок контакта СН достаточно большой, чтобы не учитывать тепловые потери с боковых сторон, поэтому процесс зажигания УТТ математически моделировался (рис. 2) одномерным уравнением распространения теплоты в образце

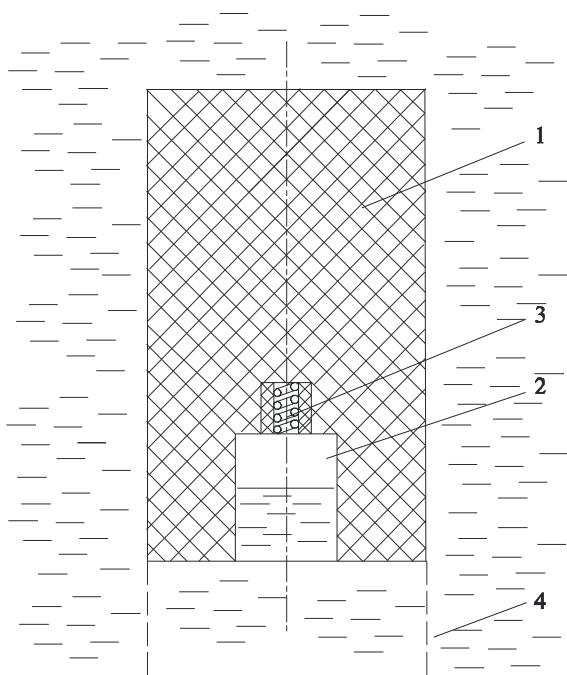


Рис. 1. Схема открытого газогенератора.

1 – шашка УТТ, 2 – канал,
3 – спираль накаливания,
4 – буферный объем.

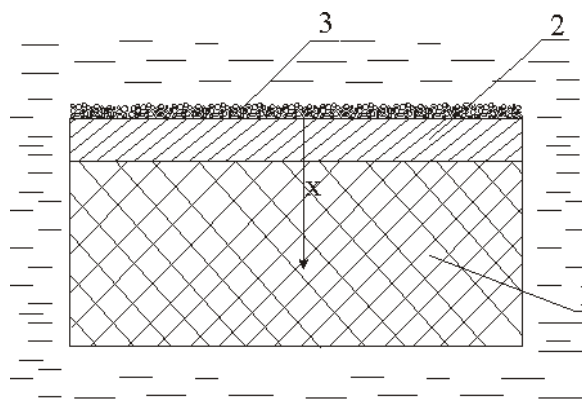


Рис. 2. Схема подводного зажигания УТТ

1 – твердое топливо,
2 – спираль накаливания,
3 – пленка пара.

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + Q \cdot z_0 \cdot \exp\left(-\frac{E}{R_u T}\right) \quad (1)$$

с начальным –

$$\text{при } t = 0 \quad T = T_0; \quad (2)$$

и граничными условиями –

$$\text{при } x \rightarrow \infty \quad T = T_0; \quad (3)$$

$$\text{при } x = 0 \quad -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} = q_1 - c_1 \rho_1 \delta_1 \frac{\partial T}{\partial t} - \alpha_1 (T - T_w), q_1 = q_0 [1 + \gamma (T - T_0)], \quad (4)$$

Как показали экспериментальные и теоретические исследования стадии зажигания УТТ, проведенные в НИИ ПММ ТГУ, температура СН достигает значений 500...600 К, поэтому может сказаться зависимость удельного электрического сопротивления сплава от температуры.

Значения температурного коэффициента для разных сплавов представлены в табл. 1.

Таблица 1–Значение температурного коэффициента для разных материалов из которых изготавливается СН

Металл	Удельное электрическое сопротивление R, 10^{-8} Ом.м	Температурный коэффициент сопротивления γ , K^{-1}
Вольфрам	5,5	0,0052
Константан	49	0,000001
Никель	7,24	0,0054
Нихром	100	0,0004

В граничном условии учтен этот фактор (4).

Переход к принятым в теории зажигания безразмерным переменным, удобным при численных расчетах, представляет формулировку (1) – (4) в виде:

$$\frac{\partial \Theta}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 \Theta}{\partial \eta^2} + \exp\left(\frac{\Theta}{1 + \beta \Theta}\right); \quad (5)$$

$$\text{при } \tau = 0 \quad \Theta = \Theta_0; \quad (6)$$

$$\text{при } \eta \rightarrow \infty \quad \Theta = \Theta_0; \quad (7)$$

$$\text{при } \eta = 0 \quad -\frac{\partial \Theta}{\partial \eta} = q - n \frac{\partial \Theta}{\partial \tau} - B(\Theta - \Theta_w), B = Bi - q\gamma. \quad (8)$$

Здесь использованы следующие параметры:

$$\beta = \frac{R_u T}{E}, \quad n = \frac{c_1 \rho_1 l_1}{c \rho l_m}, \quad q = \frac{q_0 l_m}{\beta \lambda T_m}, \quad \Theta_0 = \frac{T_0 / T_m - 1}{\beta}, \quad (9)$$

$$\Theta_w = \frac{T_w / T_m - 1}{\beta}, \quad Bi = \frac{\alpha_1 l_m}{\lambda}.$$

Для прогнозирования времени задержки t_e и температуры воспламенения T_e от параметров процесса было разработано методическое обеспечение, содержащее два подхода.

Реализация первого представляла численное интегрирование исходной краевой задачи (5) – (8), которое осуществлялось по неявной разностной схеме,

а дискретные аналоги граничных условий были получены методом фиктивных точек.

Во втором подходе расчет характеристик зажигания проводился приближенным методом, разработанным Вилюновым В.Н.

Тестирование численного метода решения проводилось путем сравнения изменения температуры поверхности образца от времени с полученным точным аналитическим методом (рис.3).

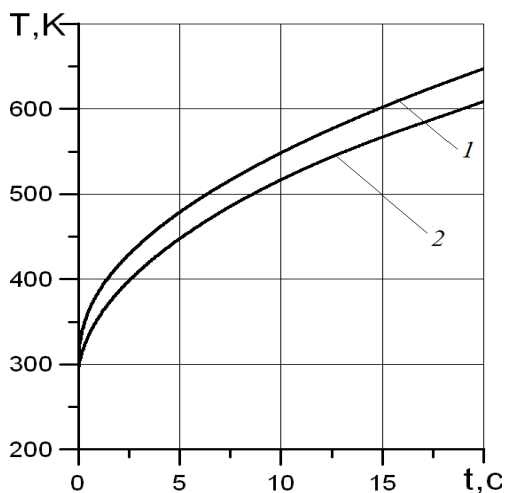


Рис. 3. Зависимость температуры поверхности образца УТТ от времени
1 – кривая – аналитический метод,
2 – кривая – разностный метод.

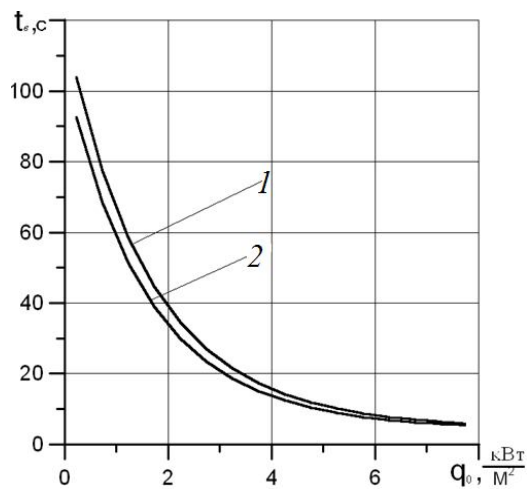


Рис. 4. Зависимость времени зажигания от плотности теплового потока СН из никеля
кривая 1 – $\gamma=0$; кривая 2 – $\gamma=0,0054 \text{ К-1}$.

Результаты параметрических исследований влияния температурного коэффициента сопротивления для СН, выполненной из никеля, показаны на рис. 4, где кривая 1 без учета температурного коэффициента сопротивления кривая 2 – с его учетом. Максимальное отличие времен задержки достигало 10%. Аналогичные исследования проводились и для СН, выполненной из нихрома. Различие во временах задержки не превышало 2%. Отсюда сделан вывод о том, что для сплавов, значения температурного коэффициента которых меньше чем у никеля, можно считать удельное электрическое сопротивление постоянным.

При подъёмно-спасательных работах с увеличением глубины погружения в подъемном устройстве (ПУ). приходится использовать до 7, а то и больше ОГ, наличие в каждом из них самостоятельной системы запуска требует использования источника электрической энергии большой емкости и переключателя. Такая ситуация снижает безотказность системы запуска и работоспособность всего ПУ.

Для преодоления отмеченных недостатков предложена схема, основанная на передаче горения от работающего ОГ к соседнему по газодинамической связи между ними (рис. 5). При запуске одного из генераторов с помощью СН продукты сгорания по дугообразной трубке вытесняют воду и попадают в канал следующего ОГ, с некоторым запаздыванием происходит запуск 2 ОГ и т.д.

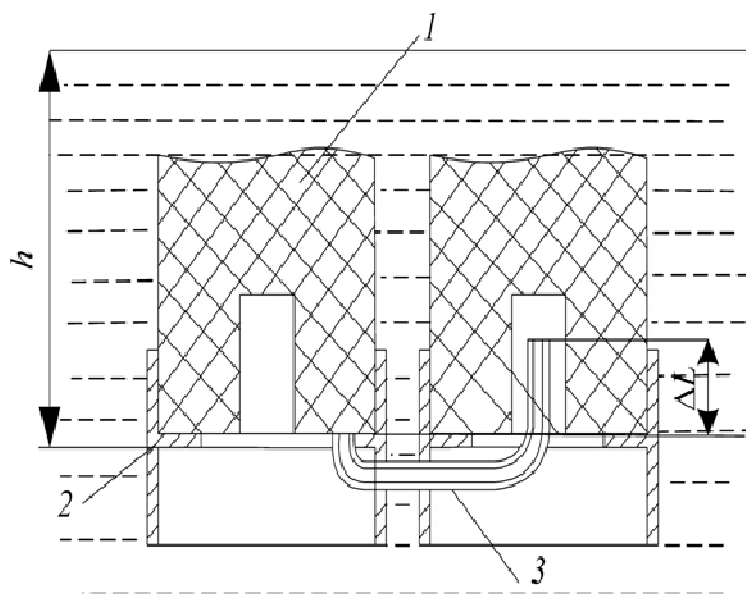


Рис. 5. Блок подводных открытых газогенераторов (ОГ).
1 – ОГ, 2 – опоры, 3 – дугобразная трубка.

Для выбора основных элементов газодинамической связи ОГ с использованием опыта проектирования трубчатых теплообменных аппаратов был выполнен приближенный расчет, из которого получено ограничение на высоту изгиба трубки $\Delta L < h \frac{k}{(k-1)} \left(4A \frac{L}{d} \right)^2$, где A – безразмерный параметр, содержащий физические и баллистические свойства УТТ.

Дальнейшее совершенствование функционирования ОГ в жидкой среде связано с возможностью многократного его запуска и останова.

На рис. 6 показана схема устройства для многократного зажигания и прерывания горения УТТ, где цифра 1 – подвижный локализатор зоны горения (ПЛЗГ), 2 – плоская СН, 3 – шашка УТТ.

Фрагменты двукратного зажигания и прерывания горения УТТ показаны рис. 7, где в начальный момент происходит зажигание, затем выход на стационарный режим горения, прерывание горения, последующий запуск и т. д.

В экспериментах гашение УТТ проводилось до 6 раз. Суммарное время горения (без учёта перерывов) в зависимости от длины образцов изменялось в пределах (24...120) с. Это время практически соответствовало скорости горения использованного УТТ при атмосферном давлении (поджатие было незначительным, поскольку оно определялось только весом ПЛЗГ).

Результаты испытаний показали, что предложенный способ управляемого сжигания УТТ обеспечивает надежное воспламенение, стабильное горение, безотказное гашение и последующее повторное зажигание. Этот способ может быть использован для дискретной подачи продуктов сгорания ОГ в емкость плавучести ПУ, что будет показано в следующей главе.

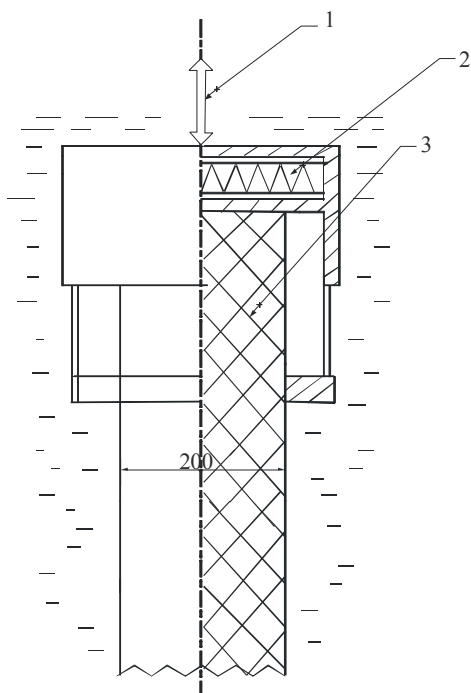


Рис. 6. Схема устройства для многократного зажигания и прерывания горения
1 – ПЛЗГ, 2 – СН, 3 – шашка УТТ.

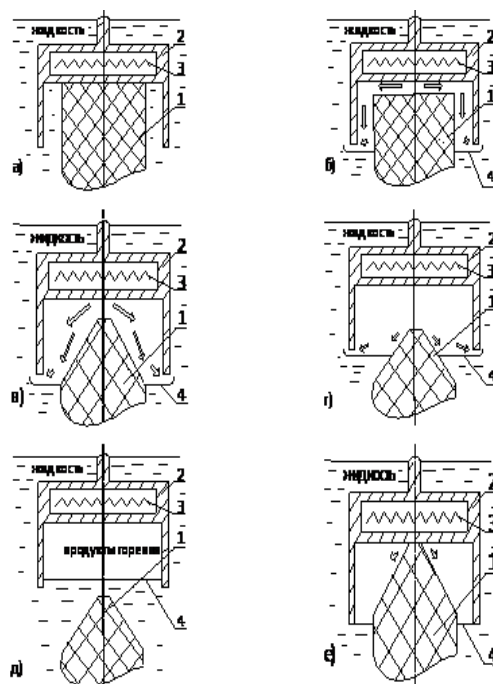


Рис. 7. Схема многократного зажигания и прерывания горения

Для расширения возможностей применения УТТ в жидких средах проведены исследования влияния перегрузки на процесс горения. С участием соискателя было разработано новое устройство для подобных исследований, показанное на рис 8.

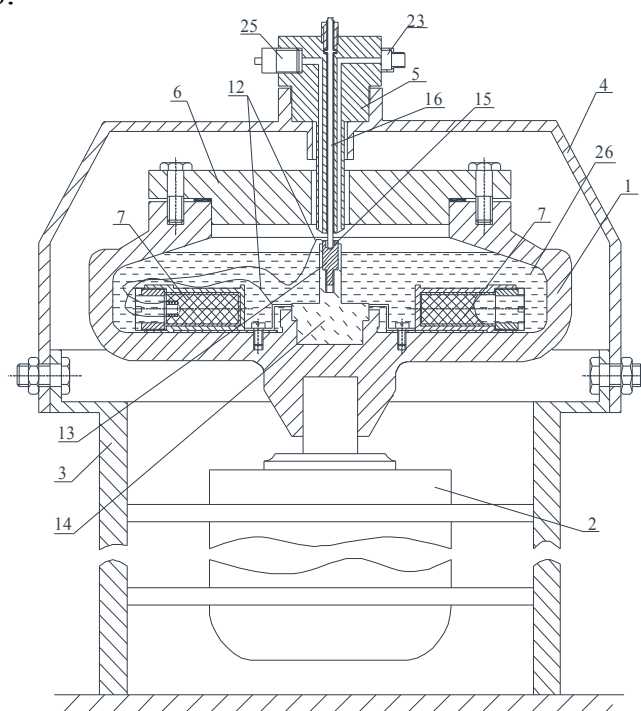


Рис. 8. Схема установки для исследования скорости горения твердого топлива в поле массовых сил

Испытания проводились при атмосферном давлении. Использовались образцы диаметром 20 мм и высотой 50 мм, которые на каждом торце имели углубления. В одном из них устанавливался воспламенитель в виде СН, а в противоположном – размещалась навеска черного пороха массой 0,5 г. На боковую поверхность образца и на торец с навеской пороха наносилась бронировка из эпоксидной смолы. Результирующая мерная база образца составляла 36 мм, которая измерялась с относительной погрешностью 0,3 %.

Время горения фиксировалось двумя способами. Первый способ заключался в записи звука процесса на микрофон с последующей его передачей на ПК. Далее производилась его обработка с помощью программы Sony Sound Forge Pro 10.0a. После анализа полученной информации устанавливались моменты начала и окончания горения. Во втором способе использовалась съемка процесса с помощью видеокамеры. Момент начала горения и окончания устанавливался по появлению продуктов сгорания (дыма) и их последующему исчезновению. Скорость горения определялась с относительной погрешностью, не превосходящей 5,3 %. На рис. 9 представлены результаты по скорости горения УТТ в поле центробежных сил.

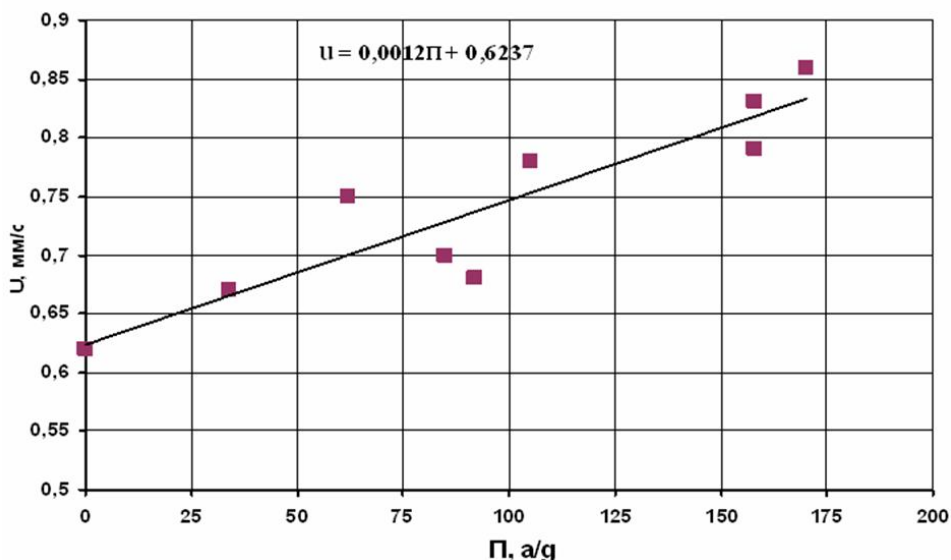


Рис. 9 Зависимость скорости горения от перегрузки

Для дальнейших исследований горения УТТ в поле массовых сил установка была модернизирована. В камере сжигания (рис. 10) было смонтировано устройство, схема которого показана на рис. 11. Испытуемый цилиндрический образец 1 с электровоспламенителем 2 в виде изолированной плоской СН и надетым ПЛЗГ 3 в виде термостойкого стакана размещены в установленной на валу 4 с возможностью вращения дискообразной камере сжигания 5.

В опытах использовались небронированные образцы УТТ диаметром 15 мм и длиной 80 мм. Для регистрации скорости вращения использовался геркон, соединенный с ПК с помощью аудиоразъёма для микрофона. Запись и обработка сигнала велась с помощью программы PowerGraph. Для фиксации перемещения ПЛЗГ использовался видеорегистратор INTEGO VX-90, обеспечивающий скорость съемки 30 кадров в секунду.



Рис. 10 Внешний вид модернизированной установки (без крышки) для проведения экспериментальных исследований

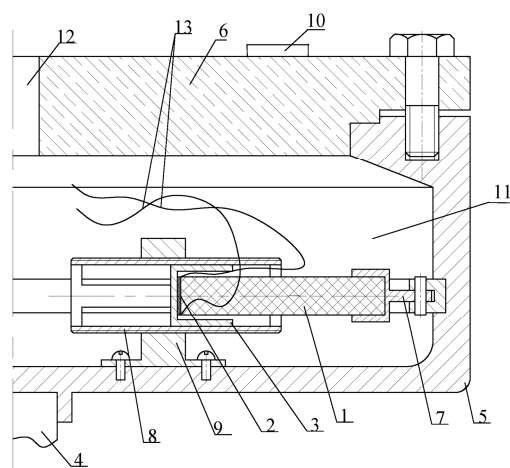
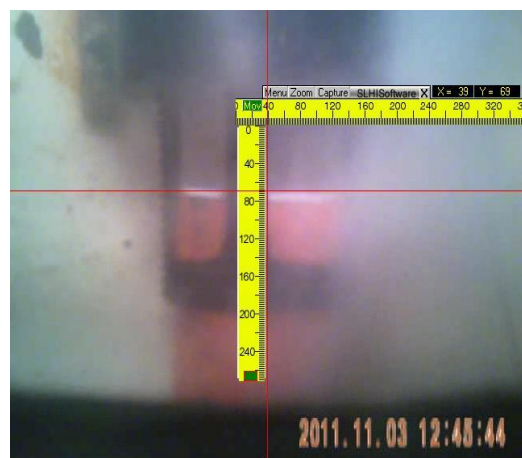


Рис. 11 Схема камеры сжигания установки для исследования подводного горения унитарных твёрдых топлив в поле центробежных сил

С помощью программы VirtualDub в видеофайл «монтировалась» виртуальная линейка. Далее фрагмент видеозаписи от начала и до конца горения «вырезался» и разбивался на серию кадров, каждый кадр имел продолжительность 1/30 секунды. Производилось сравнение положения ПЛЗГ по отношению с виртуальной линейкой.



а)



б)

Рис. 12. Начальное (а) и промежуточное (б) положения подвижного локализатора зоны горения

На рис. 12 представлены фотографии ПЛЗГ в исходном положении (а) и через 4,4 секунды от начала движения (б). Верхний край ПЛЗГ на обеих фотографиях отмечен горизонтальной прямой. Далее осуществлялось масштабирование, и перерасчет переменного расстояния верхней части ПЛЗГ от центра вращения.

По полученным данным строился график зависимости координаты движения ПЛЗГ R от времени t . На рис. 13 приведён типичный график

движения ПЛЗГ в зависимости от t при средней относительной перегрузке 252,8.

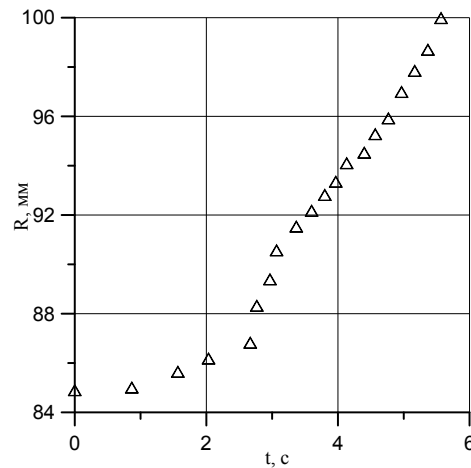


Рис. 13. Зависимость координаты подвижного локализатора зоны горения, от времени при частоте вращения 25,5 с-1 и диапазоне изменения перегрузки от 2,5 до 255

При разработке упрощённой математической модели движения ПЛЗГ возможным влиянием обдувающего потока на скорость горения пренебрегалось.

Результатом влияния периодического разрушения «носика» конуса на темп газообразования является уменьшение толщины горящего свода в радиальном направлении. Поэтому в приближенном расчете скорости продвижения ПЛЗГ использовалось подобие треугольников, построенных на профиле усечённого конуса поверхности горения и на векторах скорости горения u_g и скорости движения ПЛЗГ U (с учётом разрушения топлива при достижении критического радиуса r_*) рис. 14.

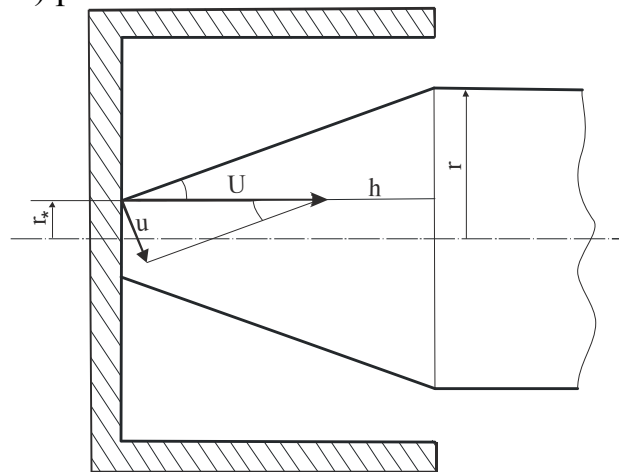


Рис. 14 – Схема взаимодействия ПЛЗГ и УТГ.

$$U / u_g = [h_p^2 + (r - r_*)^2]^{0,5} / (r - r_*), \quad (10)$$

где h_p – высота газовой полости ПЛЗГ, r – радиус образца топлива.

Критический радиус зависит от прочностных характеристик топлива и от размера массовых сил. Его оценка была получена из соотношения

$$r_* = ((m_l g G_l) / (\pi \sigma))^{0,5}, \quad (11)$$

где m_l – масса ПЛЗГ, G_l – средний размер перегрузки (отношение центробежной силы к силе тяжести), σ – допустимое напряжение для исследуемого УТТ.

Величину G определяли из соотношения

$$G_l = (2\pi N)^2 R / g, \quad (12)$$

где N – частота оборотов камеры сжигания.

Величина R является расстоянием от оси вращения центрифуги не до поверхности горящего торца, а до центра тяжести ПЛЗГ (у использованного в экспериментах ПЛЗГ центр тяжести отстоял от донной части на 10 мм). С учётом выражения (11) соотношение для определения скорости движения ПЛЗГ приняло вид

$$U = u_g \{ h_p^2 + [r - (G_l m_l g / \pi \sigma)^{0,5}]^2 \}^{0,5} / [r - (G_l m_l g / \pi \sigma)^{0,5}]. \quad (13)$$

Здесь величина u_g зависит от давления. Для УТТ, использованного в экспериментах в пределах диапазона реализованных давлений p , закон горения аппроксимирован линейной зависимостью $u_g = 0,45 + 1,94p$, в которой давление p подставляется в МПа, скорость – в мм/с.

Размер приращения гидростатического давления Δp_1 , создаваемого центробежной силой по сравнению с атмосферным на уровне центра тяжести ПЛЗГ, определяется толщиной слоя воды

$$\Delta p_1 = 2\rho\pi^2 N^2 (R^2 - R_0^2) = 2\rho\pi^2 N^2 H(R + R_0), \quad (14)$$

где R_0 – расстояние от оси вращения камеры сжигания до поверхности воды, H – расстояние от поверхности воды до координаты центра тяжести ПЛЗГ.

Нормальная скорость горения определяется давлением на выходе из ПЛЗГ (ввиду его жёсткости), который находится ниже по ходу перегрузки на соответствующую величину l . Поэтому учитывалась дополнительная добавка давления Δp_2 , равная

$$\Delta p_2 = 2\rho\pi^2 N^2 [(R + l)^2 - R^2] = \rho g l G_l + 2\rho\pi^2 N^2 l^2. \quad (15)$$

Подставив эти добавки в выражение для скорости горения, включая атмосферное давление, получили соотношение для определения нормальной скорости горения при давлении, имеющем место при действии перегрузок

$$u_g = 1,94[0,1 + \rho g(0,5H + l)G_l + 2\rho\pi^2 N^2 (HR_0 + l^2)] + 0,45. \quad (16)$$

Для сравнения экспериментальных значений скорости движения ПЛЗГ были проведены расчёты по полученным соотношениям. Использовались следующие характеристики: $h = 20$ мм, $r = 7,5$ мм, $m = 41,3$ г, $\sigma = 10$ МПа, $l = 15$ мм, $R_0 = 26$ мм.

В табл. 2 приведены расчетные (M_p) и экспериментальные (M) значения скорости движения ПЛЗГ.

Таблица 2–Значения скорости движения ПЛЗГ и перегрузки

G_l	M , г/(см ² с)	M_p , г/(см ² с)
23,4	0,25	0,33
53,2	0,38	0,36
148	0,46	0,47
220,2	0,57	0,54
252,8	0,78	0,59
259,5	0,76	0,59

Полученные опытные данные представлены на графике рис.15

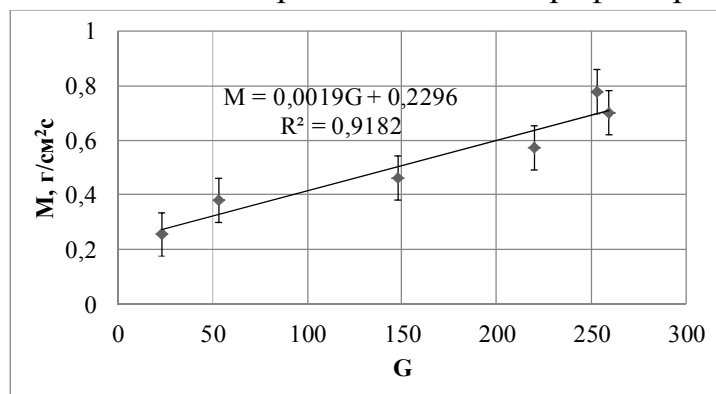


Рис. 15. Экспериментальная зависимость скорости движения ПЛЗГ от перегрузки

Теоретически было показано, что скорость движения ПЛЗГ определяется произведением двух составляющих: одна составляющая связана с увеличением поверхности горения за счёт ПЛЗГ и с периодическим разрушением острия конусной части горящего образца, другая составляющая определяется увеличением нормальной скорости горения при повышении гидростатического давления, обусловленного наличием массовых сил. Обе составляющие при увеличении перегрузки приводят к росту скорости движения ПЛЗГ.

В третьей главе представлено физико-математическое моделирование всплытия подъемных устройств с грузами на основе ОГ.

На рис. 16 изображена схема эластичного понтона, где 1—кожух 2—ОГ, 3—эластичная оболочка. После запуска ОГ продукты сгорания барботируют сквозь слой воды и постепенно охлаждаются, вытесняя воду и наполняя эластичную оболочку. При превышении силы Архимеда над силой веса груза происходит всплытие системы «подъемное устройство + груз».

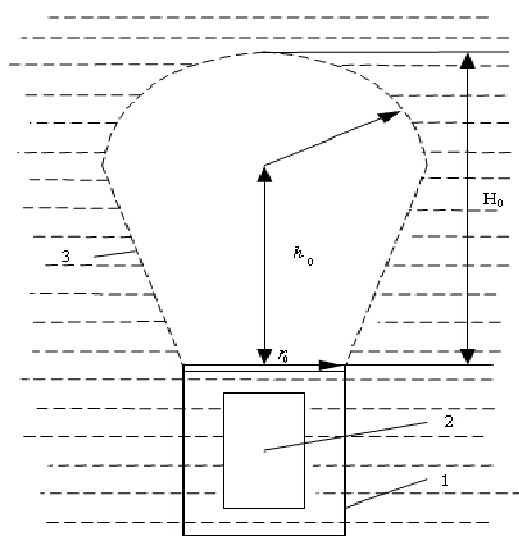


Рис. 16. Схема эластичного понтона
1 — кожух, 2 — ОГ, 3 — эластичная оболочка

Количественный анализ этого процесса проводился на основе обобщения существующей физико-математической модели, включающей в себя для продуктов сгорания, находящихся в оболочке:

1. Закон сохранения массы –

$$\frac{dM_g}{dt} = \rho_f S_f N \frac{de_f}{dt} - G_r e_w. \quad (17)$$

2. Закон сохранения энергии –

$$\frac{d}{dt}(c_v T M) = K_T c_p T_p \rho_f S_f N \frac{de_f}{dt} - p_g \frac{dW_g}{dt} (1 - e_w) - \alpha_s (T - T_s) S - c_p T G_r e_w. \quad (18)$$

3. Зависимость линейной скорости горения от давления

$$\frac{de_f}{dt} = a + b(p / p_1)^n. \quad (19)$$

4. Уравнение теплового баланса для стенки оболочки

$$c_s \rho_s \delta_s \frac{dT_s}{dt} = \alpha_s (T - T_s) - \alpha_w (T_s - T_w). \quad (20)$$

5. На стадии наполнения оболочки ее вместимость заменялась эквивалентной по объему сферической полостью, что дало возможность использовать уравнение Рэлея

$$r \frac{dv}{dt} = \frac{p_g - p_h}{\rho_w} - \frac{3}{2} v^2. \quad (21)$$

6. Уравнение неравномерного прямолинейного движения твердого тела в вязкой несжимаемой жидкости

$$(M_\Sigma + M_n) \frac{du}{dt} = (\rho_w - \rho) g W - P_{gr} - F_w. \quad (22)$$

7. Нахождение глубины h , на которой находится в текущий момент времени система «ПУ+груз»

$$\frac{dh}{dt} = u. \quad (23)$$

8. Уравнение состояния идеального газа

$$p = \frac{M_{cm} \cdot R_{cm} \cdot T_g}{V_g}. \quad (24)$$

Начальные условия

$$t=0, e_f=v=u=0, r=r_0, T_g=T_0, T_s=T_{0s}, M_g=M_0, h=h_0. \quad (25)$$

Задача Коши (17)–(25) решалась с помощью метода Рунге-Куты-Мерсона.

Для проверки достоверности полученных результатов был проведен модельный эксперимент, методика обработки результатов которого разработана соискателем. В лабораторной установке с прозрачными стенками, заполненной водой, размещалась модель подъемного устройства.

Для получения зависимости глубины от времени производилась визуализация процесса всплытия модельного ПУ (рис. 17). Съемка процесса производилась видеокамерой SONY со скоростью съемки 30 кадров в секунду. Полученная видеозапись разбивалась на кадры, далее измерялось положение

днища ПУ с виртуальной линейкой. Произведя масштабный переход по полученным данным, построен график зависимости глубины всплытия ПУ от времени (рис. 18), где 2 – экспериментальная кривая, 1 – расчетная кривая.

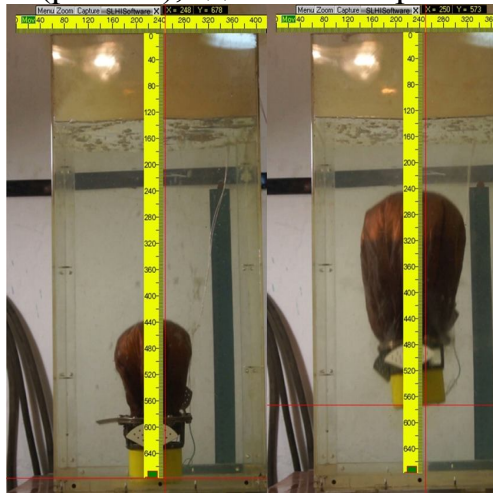


Рис. 17. Визуализация процесса измерения всплытия ПУ

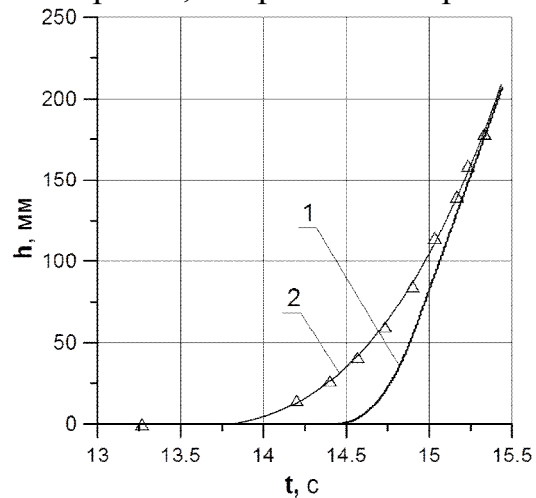


Рис. 18. Зависимость глубины всплытия ПУ от времени
1 – расчетная кривая,
2 – экспериментальная кривая.

Результаты анализа влияния разных марок топлива на изменения глубины и температуры стенки оболочки от времени отражены на рис. 19 и рис. 20, основные характеристики УТТ приведены в табл. 3. Номера кривых совпадают с номерами марок УТТ в табл. 3.

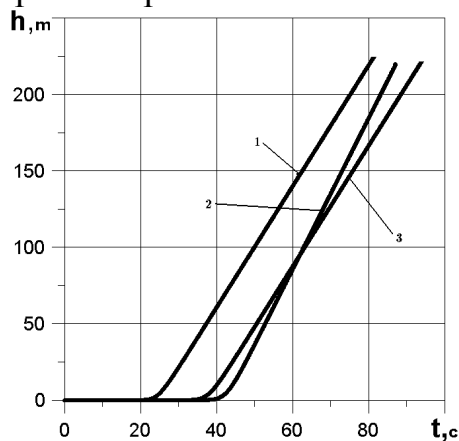


Рис. 19. Зависимость глубины всплытия «ПУ + груз» от времени

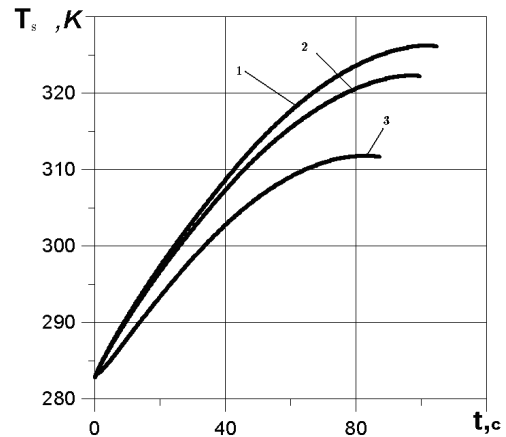


Рис. 20. Зависимость температуры стенки оболочки ПУ от времени

Таблица 3–Основные характеристики топлив

Марка топлива	Плотность, кг/м ³	Температура горения, К	Удельная газовая постоянная, Дж/кг·К	Показатель в законе скорости горения ν
1	1600	2300	350	0,54
2	1520	1600	398	0,59
3	1470	1273	462	0,56

Параметрический анализ влияния радиуса и высоты оболочки, имеющей форму усеченного конуса, соединенного с полусферой, на процесс подъема показал (рис. 21), что для снижения нагрузки на стенки эластичной оболочки и уменьшения материала на ее изготовление, а также уменьшения скорости всплытия ПУ требуется использовать оболочку с малой высотой.

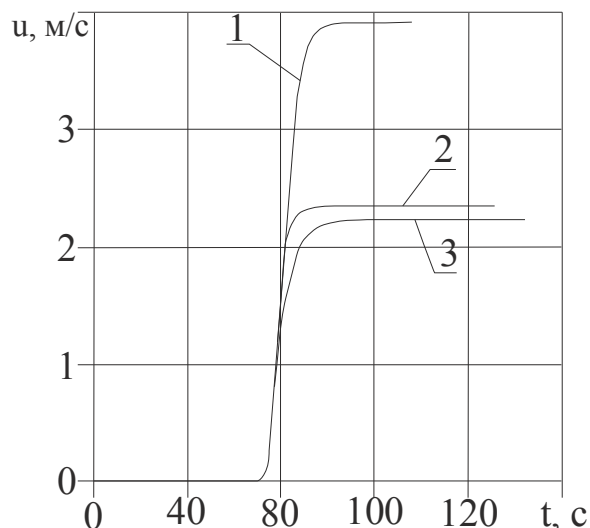


Рис. 21. Зависимость скорости всплытия ПУ от времени

1-я кривая – $H = 4$ м, $R = 0,5$ м, $S = 10,9$ м²,

2-я кривая – $H = 3$ м, $R = 0,6$ м, $S = 9,5$ м²,

3-я кривая – $H = 2$ м, $R = 0,8$ м, $S = 8,7$ м².

Для увеличения шага по времени упрощено уравнение Рэлея путем пренебрежения его динамической части. Как видно из табл. 4, в задаче наполнения оболочки имеется различие в 2% на заключительной стадии, что вполне удовлетворяет требованиям прикладного математического моделирования

Таблица 4–Сравнение результатов расчета всплытия ПУ учетом и без учета динамической составляющей в уравнении Рэлея

$t, \text{ с}$	0,01	0,03	0,05	0,07	0,09	0,11	0,14
$r, \text{ м}$	0,056	0,135	0,195	0,296	0,377	0,458	0,579
$\tilde{r}, \text{ м}$	0,040	0,121	0,182	0,283	0,364	0,445	0,566
$\epsilon, \%$	28,6	10,4	6,6	4,4	3,4	2,8	2,2

Поднимаемый груз может быть занесен илом или галькой и для его отрыва необходимо приложить дополнительную силу, создаваемую понтоном. Учет сил сопротивления грунта в уравнении (22) осуществлен приближенной зависимостью, принятой в судоподъемных работах.

Параметрический анализ влияния сил присоса показал, что при их отсутствии скорость всплытия системы «ПУ+груз» нарастает плавно, т. к.

происходит постепенное превышение подъемной силы над силой веса поднимаемого груза. При учете сил присоса наблюдается резкое нарастание скорости всплытия ПУ с грузом, что отрицательно сказывается на тросах, с помощью которых ПУ крепится к поднимаемому объекту. В случае продувки балластной цистерны ОГ происходит повышенный расход УТТ, поскольку не удается осуществить прекращение подачи от него газов. Необходимость обеспечения подъема с малой скоростью, а в предельном случае – остановка этого процесса, вызвало совершенствование стадии вытеснения воды из балластной цистерны за счет реализации дискретной подачи продуктов сгорания. Для решения этой задачи предложено использовать модернизированный вариант ОГ с ПЗЛГ.

На рис. 22 показана зависимость безразмерного перепада от времени, где кривая 1 – без отключения ОГ, 2 – отключение ОГ при продувке 20% от вместимости, 3 – отключение ОГ при продувке 30% от вместимости. На рис. 23 представлена соответственно доля продутого объема от времени.

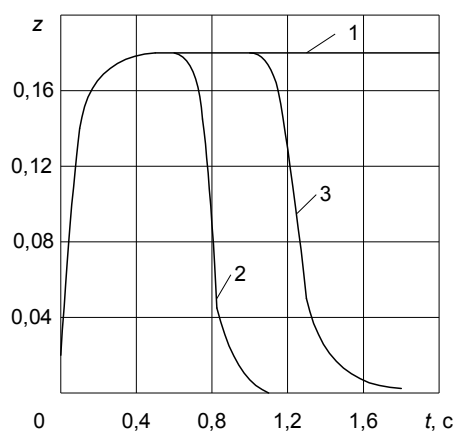


Рис. 22. Зависимость безразмерного перепада давления от времени

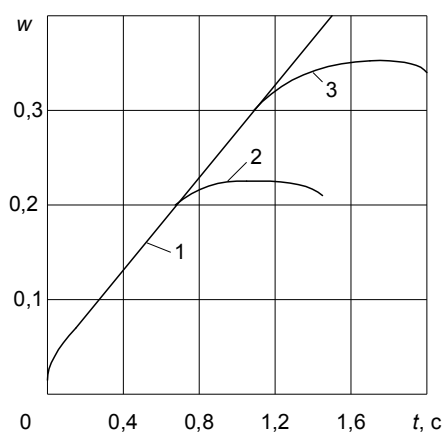


Рис. 23. Зависимость доли продутого объема от времени

За счет выключения ОГ и последующего его запуска с помощью СН возможна реализация ступенчатого изменения подъемной силы понтона, необходимого при доставке затонувших среднегабаритных объектов на поверхность воды.

В главе 4 предложены усовершенствованные схемы устройств на основе УТТ для повышения эффективности проведения аварийно-спасательных и подводно-технических работ.

На рис 24 показана схема для импульсного тушения пожара, содержащая бак с водой, силовой агрегат из водяного насоса и привода, пожарный рукав и ствол с насадкой для подачи тонкораспыленной воды, которая была предложена НИИ ПММ ТГУ с участием соискателя.

При развитом интенсивном пожаре тушение следует начинать не с наиболее активных очагов, а с тех поверхностей горения, которые легче поддаются гашению с одновременным понижением радиационного теплоприхода от окружающей среды.

Такую задачу предложено решить тем, что воду распыляют равномерно по всему объему помещения в импульсном режиме с орошением стен и всех

поверхностей, находящихся в нем объектов. При этом последующие импульсные подачи осуществляют в начале очередной активизации пожара.

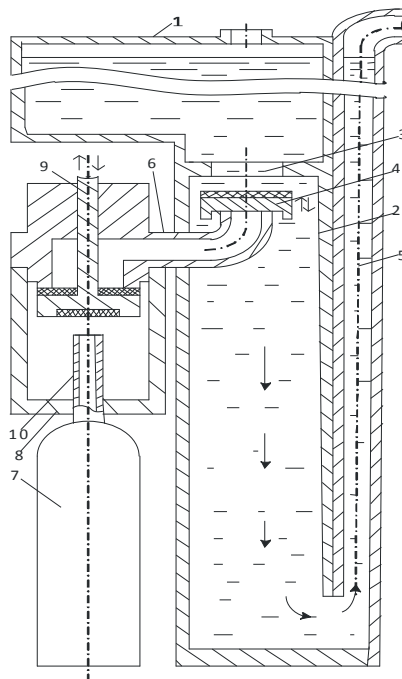


Рис. 24. Устройство для тушения пожаров при порционной подаче жидкости.

Длительность подачи предлагается выбирать из расчета достижения такого состояния, когда все помещение одновременно занято движущимися частицами воды или пара. В качестве источника для создания газоприхода, вместо баллона с газом можно использовать ОГ с управляемой системой работы.

Предложенный способ пожаротушения, а также устройство для его реализации позволяет понижать температуру в помещении, уменьшая тем самым объемное и поверхностное излучение, поддерживающее горение, и использовать охлаждающее воздействие свежего воздуха во время пауз между импульсными подачами жидкости.

Огневые методы применяются для обезвреживания промышленных сточных вод, содержащих большое количество органических примесей. Они базируются на окислении токсичных органических примесей высокотемпературными продуктами сгорания химического топлива. Практическая реализация части огневых методов осуществляется использованием аппаратов погружного горения, представляющих собой цилиндрические сосуды с коническими днищами и сферическими крышками, на которых установлена погружная горелка с выносной камерой сгорания, рассчитанной на сжигание природного газа, непрерывного подаваемого в нее. Можно использовать для данного процесса устройство на основе ОГ, при этом интенсифицировать тепловое воздействие за счет вращения камеры рис. 8, где происходит обезвреживание сточных вод. При этом достигается большая полнота сгорания за счет увеличения гидростатического давления.

С целью повышения эффективности демонтажа подводных конструкций, разрушения ледяного покрова предложено применять взрывчатое вещество в

сочетании с полостью, отделяющей его от преграды, создаваемой устройством с оболочкой.

При проведении подводных аварийно-спасательных и подводно-технических работ может возникнуть ситуация, когда потребуется его экстренное всплытие. Для этого существуют различные спасательные средства, обеспечивающие положительную плавучесть. Рассмотрена схема аварийного всплытия водолаза с помощью оболочки, наполняемой охлажденными продуктами сгорания из ОГ рис. 25.

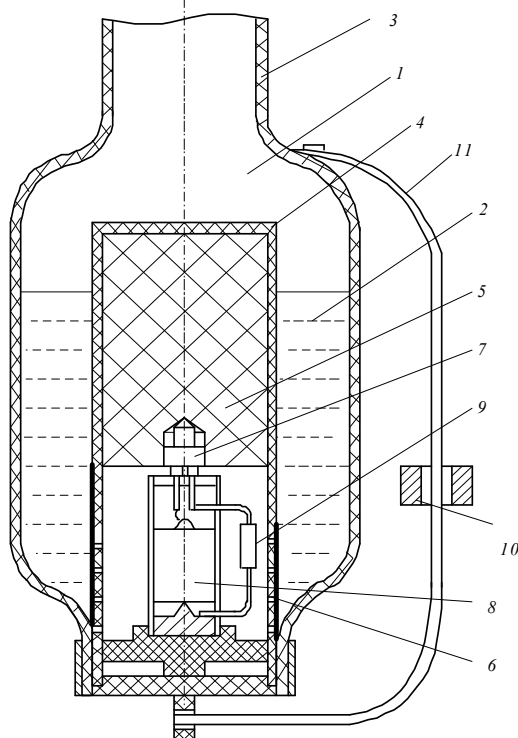


Рис. 25. Схема устройства предназначенного для спасения водолаза выполненная на основе ОГ

Работает такая схема создания подъемной силы следующим образом. При необходимости аварийного всплытия водолаз перемещает магнит *10* по тросику *11* вдоль подвесного кармана *1*, при этом срабатывает геркон и замыкает электрическую цепь. Ток от источника питания *8* нагревает СН электровоспламенителя *7*, который в свою очередь зажигает шашку *5*. Образующиеся при сгорании шашки УТТ *5* газы выходят через отверстия *6* и, проходя через воду, охлаждаются, а затем по газопроводу *3* попадают в жилет и надувают его. После чего происходит аварийное всплытие водолаза.

Расчет габаритно-весовых характеристик проводился следующим образом. Пусть *V* – вместимость оболочки надувного жилета, заполнение которой предполагается осуществлять при гидростатическом давлении *p_н*. Значение *V* выбиралось из условия обеспечения заданной подъемной силы *F*:

$$F = \rho_w g V . \quad (26)$$

По уравнению состояния идеального газа для охлажденных продуктов сгорания УТТ, вычисляется их масса:

$$M = (p_h + p_l)V / (R_g T), \quad (27)$$

где T – температура газов в оболочке.

Принимая массу сгоревшего УТТ, равной массе газов, находящихся в оболочке, получено

$$M_f = (p_h + p_l)V / (R_g T) = hF / (R_g T), \quad (28)$$

где h – глубина нахождения оболочки.

Например, для создания $F=20$ кгс на глубине $h=80$ м при температуре $T=320$ К и $R_g=380$ Дж/(кг К) требуется $M_f=0,125$ кг.

Расчет аварийного подъема водолаза по программе, моделирующей всплытие устройства с эластичной оболочкой, показал, что возможна организация этой операции с малой скоростью, когда не возникает кессонная болезнь.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. При зажигании УТТ СН в жидкой среде для сплавов, у которых температурный коэффициент сопротивления близок или меньше, чем у нихрома, можно не учитывать его влияние.
2. Впервые предложен и отработан способ управляемого сжигания УТТ (при движении фронта горения сверху вниз), который обеспечивает надежное воспламенение, стабильное горение, безотказное прерывание горения и последующее повторное зажигание. Этот способ может быть использован для дискретной подачи продуктов сгорания ОГ в емкость плавучести.
3. Показано, что в математической модели при описании стадии наполнения эластичных оболочек сферической формы подъемного устройства допустимо не учитывать динамическую составляющую в уравнении Рэлея.
4. Реализована регулировка подъемной силы понтона, необходимая при доставке затонувших среднегабаритных объектов на поверхность воды с допустимой скоростью за счет использования ОГ с подвижным локализатором горения и клапана.
5. Предложена методика расчета характеристик устройства для пожаротушения, позволяющего понижать температуру в помещении, уменьшать тем самым объемное и поверхностное излучение, поддерживающее горение.
6. Предложены методики обработки экспериментальных данных на основе визуализации процесса горения УТТ в жидкой среде, позволяющие получать качественную и количественную информацию. Установлено, что массовая скорость горения УТТ возрастает прямо пропорционально перегрузке.
7. Сжигание УТТ в установке, где на обезвреживаемые сточные воды действует центробежная сила, позволяет не только интенсифицировать процесс теплообмена между продуктами сгорания и окружающей жидкостью, но и повышает полноту химического тепловыделения.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Барсуков В.Д. Возможность обеспечения регулируемой продувки балластной цистерны понтона открытым газогенератором / В.Д. Барсуков, **С.А. Басалаев**, С.В. Голдаев // Известия вузов. Физика.– 2008. – Т. 51.– № 8/2.– С. 28–32.
2. Барсуков В.Д. Исследование подводного горения конденсированных веществ в поле центробежных сил / В.Д. Барсуков, **С.А. Басалаев**, С.В. Голдаев, Н.П. Минькова, К.В. Пахмутов., Г.А. Цыба // Известия вузов. Физика.– 2010. – Т. 53.– № 12/2.– С. 31–34.
3. Барсуков В.Д. Об упрощении учета разворачивания эластичной оболочки подъемного устройства / В.Д. Барсуков, **С.А. Басалаев**, С.В. Голдаев // Известия вузов. Физика.– 2010. – Т. 53. – № 12/2.–С. 27–30.
4. Барсуков В.Д. Повышение эффективности тушения развившихся пожаров в помещениях при порционной подаче жидкости / В.Д. Барсуков, Н.П. Минькова, С.В. Голдаев, **С.А. Басалаев** // Пожарная безопасность. – Москва. – 2011.– № 3.– С. 78-83.
5. Барсуков В.Д. Открытый газогенератор с многократным запуском для продувки глубоководного понтона / В.Д. Барсуков, **С.А. Басалаев**, С.В. Голдаев, Н.П. Минькова // Химическая физика и мезоскопия.– 2012. – Т. 14. – № 3. – С. 327–334.
6. Патент 2370292 Российская Федерация, МПК7 А62С 3/00, А62С 35/02, А62С 27/00. Способ пожаротушения в помещениях и устройство для его осуществления / В.Д. Барсуков, **С.А. Басалаев** С.В. Голдаев, Н.П. Минькова; патентообладатели ГОУВПО Томский государственный университет, Барсуков В.Д. – №2007127397/12; заявл. 17.07.2007; опубл. 27.01.2009, Бюл. № 29.– 11 с.
7. Патент 2357094 Российская Федерация. Способ управления сжиганием унитарного твердого топлива в жидкой среде и газогенератор / В.Д. Барсуков, **С.А. Басалаев**, С.В. Голдаев и др.; Оpubл. в Бюллетене № 21 от 27.05.2009.
8. Патент 2425283 Российская Федерация, МПК F23В 99/00, F02К 9/08. Устройство для исследования подводного горения унитарных твёрдых топлив при перегрузках / В.Д. Барсуков, **С.А. Басалаев**, С.В. Голдаев, К.В. Пахнутов; Заявл 11.08.2009; Оpubл. 27.07.2011. Бюл. № 21.
9. Барсуков В.Д. Математическое моделирование подъема малогабаритных предметов мягким понтоном, наддуваемым газогенератором открытого типа / В.Д. Барсуков, **С.А. Басалаев**, С.В. Голдаев //Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики. Томск: Изд-во Том. ун-та, 2002. – С. 32–33.
10. Барсуков В.Д. Об оценке возможности эстафетного запуска подводных газогенераторов по газодинамической схеме / В.Д. Барсуков, **С.А. Басалаев**, С.В. Голдаев //Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики: Доклады конференции. Томск: Изд-во Том. ун-та, 2004. – С. 57–58.

11. Барсуков В.Д. Особенности подводного горения унитарного твердого топлива с зоной газообразования в верхней части / В.Д. Барсуков, **С.А. Басалаев**, С.В. Голдаев, Н.П. Минькова // Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики: Доклады конференции. Томск: Изд-во Том. ун-та, 2004. – С.55–56.
12. Барсуков В.Д. Физико-математическое моделирование работы устройства, предназначенного для аварийного всплытия водолаза / В.Д. Барсуков, **С.А. Басалаев**, С.В. Голдаев, Н.П. Минькова // Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики: Доклады конференции. Томск: Изд-во Том. ун-та, 2006. – С.61–62.
13. Барсуков В.Д. Способ управления подводным сжиганием унитарного твердого топлива с возможностью прерывания горения и повторного зажигания / В.Д. Барсуков, **С.А. Басалаев**, С.В. Голдаев и др. // Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 2008. – С.59–60.
14. Барсуков В.Д. Расчет характеристик зажигания унитарного твердого топлива спиралью накаливания с учетом зависимости удельного электрического сопротивления от температуры / В.Д. Барсуков, **С.А. Басалаев**, С.В. Голдаев // XIV Международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии» / Сборник трудов в 3-х томах. Т. 3. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2008. – С.335–337.
15. Барсуков В.Д. Анализ влияния формы эластичной оболочки на всплытия подъемного устройства с грузом. / В.Д. Барсуков, **С.А. Басалаев**, С.В. Голдаев // Современная баллистика и смежные вопросы механики: Сборник материалов научной конференции. – Изд-во Том. Ун-та, 2009. С.127–129.
16. Барсуков В.Д. Анализ влияния отрывного сопротивления на начальную стадию всплытия подъемного устройства с грузом / В.Д. Барсуков, **С.А. Басалаев**, С.В. Голдаев // Труды Томского государственного университета. – Т.276. – Сер. Физико-математическая: Молодежная научная конференция Томского государственного университета 2010 г. – Томск: Изд-во Том. Ун-та, 2010. – С. 95–98.
17. Барсуков В.Д. Снижение отрицательного воздействия на окружающую среду процесса подводного демонтажа конструкций / В.Д. Барсуков **С.А. Басалаев**, Н.П. Минькова, С.В. Голдаев, Р.И. Чумаров // Труды XXIII семинара по струйным, отрывным и нестационарным течениям (с международным участием). – Томск: Изд-во Том. политех. ун-та, 2012. – С. 46 – 50.
18. Барсуков В.Д. Физико-математическое моделирование процесса всплытия подъемного устройства на основе твердотопливного открытого газогенератора / В.Д. Барсуков, **С.А. Басалаев**, С.В. Голдаев // Мат-лы Всеросс. мол. конф. «Горение твердого топлива». – Томск: Изд-во Том. политех. ун-та, 2012. – С. 4 – 7.