

МЕХАНИКА

УДК 536.46:662.3:551.46
DOI 10.17223/19988621/39/7

В.Д. Барсуков, С.В. Голдаев, С.А. Басалаев, Н.А. Бабушкин

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОДЪЕМА ЗАТОНУВШИХ ПРЕДМЕТОВ
ПРИ ПРОДУВКЕ ПОНТОНА УПРАВЛЯЕМЫМ ОТКРЫТЫМ
ТВЁРДОТОПЛИВНЫМ ГАЗОГЕНЕРАТОРОМ¹**

Разработана математическая модель подъема затонувших предметов понтоном, продувка которого осуществляется управляемым открытым твердотопливным газогенератором. Проведен параметрический анализ влияния многократных выключений и запусков источника рабочего тела на стадиях вытеснения балласта, всплытия понтона с грузом.

Ключевые слова: *жидкая среда, гидростатическое давление, твердое топливо, поверхность горения, масса топлива, газогенератор, барботаж, теплообмен, понтон, сила Архимеда, скорость всплытия.*

Для повышения эффективности проведения аварийно-спасательных и подводно-технических операций используются устройства, в состав которых входят газогенераторы на двухосновном твердом топливе (ДТТ) [1, 2]. Однако такие источники рабочего тела не позволяли прекращать их функционирование в случае какой-либо нештатной ситуации, например при неудачном креплении поднимаемого груза [2].

Находящийся на дне затонувший объект часто заглублен в илистые отложения, и при отрыве его от грунта возникает необходимость создавать избыточную подъемную силу понтоном (П). Согласно данным работы [3], под влиянием эффекта присоса грунта фактическое превышение силы отрыва над весом объекта может достигать 40 %. В случае продувки П газогенераторами происходит повышенный расход ДТТ, поскольку не удастся прекратить подачу от него газов. Необходимость обеспечения подъема с малой скоростью, а в предельном случае – остановки этого процесса из-за возникшей нештатной ситуации, требует совершенствования стадии вытеснения воды из П за счет реализации дискретной подачи продуктов сгорания. В таких случаях целесообразно использовать открытые управляемые твердотопливные газогенераторы [4], работоспособность которых подтверждена в лабораторных исследованиях [5]. Такой газогенератор содержит топливную шашку, на верхней части которой установлен подвижный локализатор зоны газообразования (ПЛЗГ) в виде термостойкого стакана (ТС) в перевернутом положении. Донная часть ТС нагревается спиралью накаливания (СН) до температуры, превышающей температуру воспламенения $T_{\text{вс}}$ ДТТ. В результате обеспечивается выкипание прилегающей жидкости и последующее зажигание топлива.

¹ Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №15-19-10014).

По мере выгорания топлива, ПЛЗГ с отрицательной плавучестью «следит» за фронтом горения, осуществляя непрерывную локализацию зоны газообразования в динамическом режиме. За счет самопроизвольного движения ТС вниз осуществляется поддержание горения, а гашение ДТТ достигается путём остановки ТС или отвода его вверх.

Возможность регулирования подачи продуктов сгорания в П связана с прекращением горения ДТТ и повторным его воспламенением.

Процесс вытеснения воды из П вместимостью 0.2 м^3 , находящегося на глубине 50 м, открытым твёрдотопливным газогенератором (ОТГ) с однократным и многократным запуском обсуждался в работах [6, 7]. Однако всплытие модели понтона с грузом не исследовалось. Эффект использования клапана в П, который включался, когда скорость всплытия системы «понтон + груз» («П+Г») превышала допустимое значение, равное 1 м/с, рассмотрен в монографии [1]. Принцип работы клапана заключался в открытии дополнительного отверстия в стенке П, что сопровождалось сбросом определенной массы продуктов сгорания в окружающую среду. Наличие подвижного элемента – клапана, представляющего подпружиненную чашу на стержне, усложняло конструкцию П и снижало безотказность функционирования.

В реальном устройстве с грузоподъемностью несколько тонн при глубине погружения в сотни метров используются шашки, имеющие на порядок большие массогабаритные характеристики. Поэтому важно иметь представление о влиянии перечисленных эффектов на процесс вытеснения балласта и процедуру подъема. Принимая во внимание высокие затраты на экспериментальную отработку таких устройств, целесообразно воспользоваться опытом математического моделирования, использованного при разработке и испытаниях глубоководного подъемного устройства (ГПУ) с эластичной оболочкой, наполняемой продуктами сгорания [1].

Физико-математическая постановка задачи

На рис. 1 схематично изображен понтон 1, имеющий цилиндрическую форму, который при всплытии обтекается поперечным потоком воды. В стенке имеется несколько люков 2 для размещения и крепления открытых твёрдотопливных газогенераторов 4, а также горловина 3 для соединения внутреннего пространства П с окружающей водой. В качестве клапанов для снижения давления внутри П при нерасчетном режиме могут использоваться крышки люков.

Понтон с грузом находится на глубине h_0 . Стадия выхода на режим ОТГ в настоящей работе не рассматривается. Процесс вытеснения воды из П происходит в поршневом режиме, что подтверждено визуализацией функционирования ОТГ в прозрачной модели П [1]. Объемный расход вытесняемой из П жидкости в окружающую среду вычислялся по уравнению Бернулли [8]. Теплообмен продуктов сгорания с водой и стенками П принимался в форме Ньютона [9], эффекты испарения и конденсации воды при взаимодействии с газами не учитывались; снижение температуры продуктов сгорания при их барботаже через слой воды в П максимальное, соответствующее равновесной глубине, малы потери рабочего тела, обусловленные растворимостью некоторых компонентов продуктов сгорания при всплытии в слое воды.

В рамках сформулированных допущений рассматриваемая задача сводится к системе нелинейных обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ), представляющих собой балансовые соотношения для массы и энергии продуктов

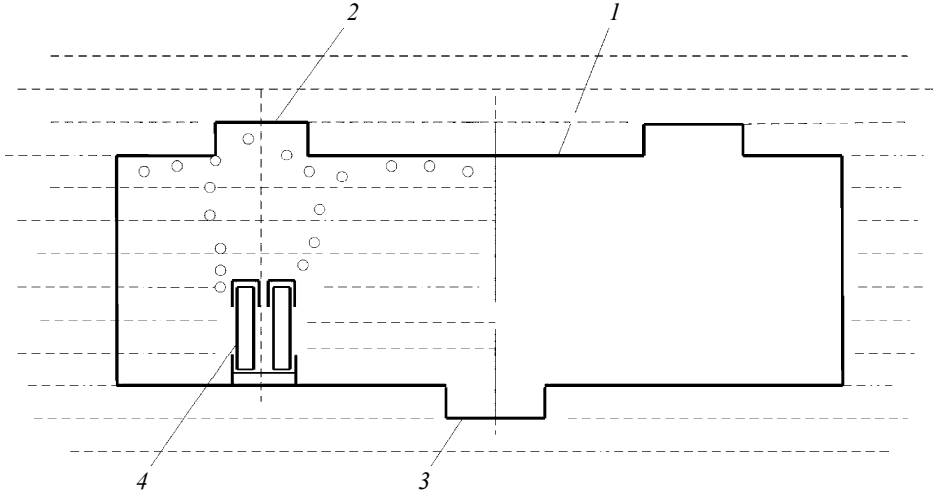


Рис. 1. Схема понтона с продувкой его с помощью ОТГ

сгорания, заполняющих переменный объем; уравнений, моделирующих степенной закон скорости горения ДТГ от давления, вытеснение воды из П в поршневом режиме, которые дополняются уравнением состояния идеального газа в дифференциальной форме, зависимостями внутренней баллистики установок на ДТГ [1], критериальным уравнением теплообмена свободной конвекции в ограниченном объеме [9]:

$$\frac{de_f}{dt} = a_f \left(\frac{p_g}{p_l} \right)^v; \quad (1)$$

$$\frac{dV_w}{dt} = \varphi_w S_G \sqrt{\frac{2(p_g - p_h)}{\rho_w}}; \quad (2)$$

$$\frac{dM_g}{dt} = G_f - G_r e_v; \quad (3)$$

$$\frac{dT_g}{dt} = \frac{(\chi c_p T_p - c_v T) G_f}{c_v M_g} - \frac{p_g}{c_v M_g} \frac{dV_w}{dt} (1 - e_v) - \frac{\alpha_s (T_g - T_w)(F_w + F_s)}{c_v M_g} - \frac{R_g T_g G_r e_v}{c_v M_g}; \quad (4)$$

$$\frac{dp_g}{dt} = \frac{R_g T_g}{V_g} \frac{dM_g}{dt} + \frac{R_g M_g}{V_g} \frac{dT_g}{dt} - \frac{p_g}{V_g} \frac{dV_g}{dt}. \quad (5)$$

Здесь e_f – толщина сгоревшего свода; T_g, R_g, k – температура, удельная газовая постоянная, показатель адиабаты продуктов сгорания; ρ_f, ρ_w – плотности ДТГ и воды; F_b, F_w – площади поверхностей, стенок П и воды, участвующие в теплообмене; φ_v – коэффициент расхода при истечении воды; p_l – атмосферное давление; a_f, v – коэффициенты аппроксимации; χ – коэффициент сохранения теплоты, учитывающий частичное охлаждение продуктов сгорания при их барботаже через слой воды, окружающей шашку; G_f, G_r – секундные массовый «приход» продук-

тов сгорания из ОТГ и расход при их истечении в окружающую среду; e_v – множитель, принимающий значение 0, когда продувка понтона не закончилась, и 1 – когда из отсеков понтона начинает истекать газ.

При вычислении секундного массового прихода продуктов сгорания из ОТГ, работающего в докритическом режиме, применяется следующая формула [10]:

$$G_g = N_f \rho_f F_f u(e_f), \quad (6)$$

где F_f – площадь горячей поверхности топлива; N_f – количество шашек.

Расчет F_f проводился на основе геометрического закона скорости горения [10] для рассматриваемого варианта ОТГ [4]. Считалось, что в начальный момент времени F_f представляет торцевую часть цилиндра F_{fT} . Затем добавляется участок боковой поверхности цилиндра, освобожденный от контакта с водой. Для упрощения алгоритма принималось, что выгорание шашки осуществляется с постоянной поверхностью, равной торцевой поверхности шашки диаметром d_f , т.е.

$$F_{fT} = 0.25 \pi d_f^2.$$

Секундный массовый расход газа из понтона при докритическом режиме истечения вычислялся по термодинамической формуле [8]

$$G_r = \Phi_G p_g S_G \left\{ \frac{2k}{(k-1) R_g T_g} \left[\left(\frac{p_h}{p_g} \right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{p_h}{p_g} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right] \right\}^{\frac{1}{2}}, \quad (7)$$

где S_G – площадь сечения горловины (кингстона); p_h – противодавление на глубине погружения; Φ_G – коэффициент расхода при истечении газа.

Изменение температуры стенки П описывается дифференциальным уравнением

$$c_s \rho_s \delta_s \frac{dT_s}{dt} = \alpha_s (T_g - T_s) - \alpha_w (T_s - T_w), \quad (8)$$

где c_s , ρ_s – соответственно удельная теплоемкость, плотность материала оболочки; δ_s – толщина стенки оболочки, α_s , α_w – коэффициенты теплоотдачи от газов к стенке П и от нее к окружающей воде. T_s – температура стенки П. Пренебрежение распределением температуры по толщине нагреваемого тела допустимо в тех случаях, когда критерий Био мал [9]. Предполагая $\alpha_s \approx 50\text{--}100 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ [1], что соответствует теплообмену охлажденных продуктов сгорания со стенками оболочки свободной конвекцией в ограниченном объеме, и принимая $\delta_s = 3 \text{ мм}$, а $\lambda_s = 45 \text{ Вт}/\text{мК}$, получаем $Bi = \alpha_s \delta_s / \lambda_s \approx 0.003\text{--}0.006$, что показывает допустимость использования уравнения (8).

Коэффициент теплоотдачи от охлажденных продуктов сгорания вычислялся из критериального уравнения вида [9]

$$Nu_s = A Ra_s^m, \quad Nu_s = \alpha_s D_p / \lambda_g, \quad Ra_s = g D_p (1 - T_s / T) / (v_g a_g). \quad (9)$$

Здесь Nu_s , Ra_s – критерии Нуссельта и Рэлея соответственно; λ_g , v_g , a_g – коэффициенты теплопроводности, кинематической вязкости и температуропроводности продуктов сгорания; g – ускорение силы тяжести; A , m – коэффициенты аппроксимации, числовые значения их выбираются с учетом режима теплообмена; D_p – диаметр П.

Так, при ламинарном режиме (для $Ra_s < 500$) – $A = 1.18$, $m = 0.125$, при переходном ($500 < Ra_s < 2 \cdot 10^7$) – $A = 0.54$, $m = 0.25$, при турбулентном (для $Ra_s > 10^7$) – $A = 0.135$, $m = 0.333$.

Вычисление характеристик переноса продуктов сгорания осуществлялось по методике, используемой в инженерных расчетах внутрибаллистических параметров устройств на ДТТ [12].

Приняв значение динамической вязкости продуктов сгорания ДТТ равной $\mu_g = 6.68 \cdot 10^{-5}$ Н·м и определив по уравнению состояния идеального газа плотность, находим кинематическую вязкость $\nu_g = \mu_g / \rho_g$.

Теплопроводность газовой смеси увеличивается с повышением температуры и давления (при $p > 1$ МПа). В среднем λ_g , двухатомных газов при повышении температуры от 273 до 573 К возрастает на 80 % [12].

При известной динамической вязкости смеси, ее теплопроводность находилась по формуле Эйкена $\lambda_g = \mu_g (c_{pg} + 1.25 R_g)$.

Температуропроводность и критерий Прандтля для газов определялись обычным образом: $a_g = \lambda_g / (c_{pg} \cdot \rho_g)$, $Pr_g = \nu_g / a_g$.

Температура стенки понтона равна температуре воды, что подтверждается статистикой развития пожаров на судах, в которой отмечалось сохранение краски на бортах, находящихся ниже ватерлинии [11].

Текущие значения площадей поверхностей теплообмена между продуктами сгорания и стенками П и водой в процессе продувки вычислялись по формулам элементарной геометрии. Предполагалось, что пространство, занимаемое продуктами сгорания, представляет собой часть цилиндра, ограниченного дугой и плоской поверхностью. Использовались известные выражения для длины дуги, опирающейся на хорду, площади образованного таким образом сегмента [13].

Поскольку геометрические размеры П и поднимаемого груза сравнительно невелики, то рассматриваемая система «П+Г» заменялась материальной точкой [1, 5]. Расчет скорости ее всплытия (U_p) осуществлялся путем интегрирования уравнения неравномерного прямолинейного движения твердого тела в вязкой несжимаемой жидкости, которое имело следующий вид [14]:

$$\frac{dU_p}{dt} = \frac{(\rho_w - \rho_g) g V_g}{M_c + M_p} - \frac{M_c (1 - k_c)(1 + k_p) g}{M_c + M_p} - k_w \frac{\rho_w U_p^2}{2(M_c + M_p)} F_{md}, \quad (10)$$

где M_c , – масса системы «П+Г»; M_p – присоединенная масса, F_{md} – площадь «миделева» сечения; k_w, k_p , – коэффициенты гидродинамической силы, присоса груза к грунту. Потеря силы веса в воде для стали учитывалась с помощью коэффициента, равного отношению плотности воды к плотности материала, из которого был изготовлен объект, в частности для стали $k_c = 0.13$ [15].

Последнее вычитаемое в правой части (10) моделирует силу сопротивления, оказываемую водой. В прикладных расчетах она представляется состоящей из двух гидродинамических сил – волновой и вязкостной [15].

Как отмечалось в [14], при движении тел в жидкости, происходящем с изменением их объема, присоединенные массы могут зависеть от времени. При этом инерционная сила, действующая со стороны воды, состоит из двух слагаемых, одно из которых пропорционально скорости движения, другое – ускорению. Однако учесть упомянутую общность в программе расчета затруднительно, так как вычисление «присоединенных» масс движущихся тел даже с фиксированным объе-

мом сложной формы представляет очень трудную задачу [14]. С другой стороны, динамическая стадия всплытия «П+Г», в течение которой появляются подобные эффекты, реализуется тогда, когда сила Архимеда по какой-либо причине существенно превысит вес поднимаемого объекта. Следует заметить, что в любом случае для рассматриваемой задачи динамическая стадия всплытия составляет малую часть от всего времени достижения поверхности воды. Поэтому пренебрежение одной из составляющих инерционной силы может привести к некоторому завышению скорости всплытия на данном этапе подъема [1].

Для определения глубины h , на которой находится в текущий момент времени система «П+Г», добавлено дифференциальное уравнение

$$\frac{dh}{dt} = U_p. \quad (11)$$

Таким образом, задача о расчете параметров вытеснения воды из П и всплытия его с грузом сведена к интегрированию выписанной системы нелинейных обыкновенных дифференциальных уравнений.

Начальные условия к ним имели следующий вид:

$$\begin{aligned} e_f &= 0, \quad V = V_0 \cong 0.01W_p, \quad M_g = 0.01M_f, \quad p_g = 1.02 p_h, \\ T_g &= 350 \dots 400 K, \quad T_{s0} = 280 K, \quad U_p = 0, \quad h_0 = 300 \text{ м}. \end{aligned} \quad (12)$$

Моделирование регулирования процесса продувки и связанного с этим изменения подъемной силы осуществлялось следующим образом. При превышении доли продутого объема определенного значения или скорости всплытия системы «П+Г», либо времени процесса «отключался» приход газа. Соответственно в уравнении сохранения массы (3) учитывалось прекращение поступления рабочего тела, а в уравнении сохранения энергии (4) – уменьшение поступления энтальпии продуктов сгорания, обусловленное отсутствием этого прихода.

Приближенный численный метод решения

Численное решение выписанной системы нелинейных обыкновенных дифференциальных уравнений осуществлялось с помощью метода Рунге – Кутты четвертого порядка точности [16]. Для удобства реализации математической модели и проведения параметрического анализа в исходной системе дифференциальных уравнений был осуществлен переход к безразмерным переменным, которые здесь не выписываются из-за своей громоздкости.

Расчеты проведены для понтона, имеющего диаметр 1.25 м, длину 4 м, вместимость 5 м³. Соответственно максимальная подъемная сила равна 50 кН, а сила веса на воздухе поднимаемого груза равна 40 кН. Собственный вес понтона (тонкостенная оболочка) составлял 4.5 кН. Диаметр горловины для истечения воды равен 0.2 м, коэффициенты расхода при вытеснении воды $\mu_1 = 0.6$, при истечении продуктов сгорания – $\mu_G = 0.85$. Коэффициент сопротивления со стороны воды при рассматриваемом варианте движения понтона и формы поднимаемого груза – цилиндра больших размеров, был выбран равным 0.85; коэффициент присоса груза к грунту – 0.2; коэффициенты аппроксимации в степенном законе скорости горения $a_f = 1.013 \cdot 10^{-3}$ м/с, $v = 0.54$; удельная газовая постоянная $R_g = 330$ Дж/(кг·К), показатель адиабаты продуктов сгорания $k = 1.25$; плотность ДТГ $\rho_f = 1600$ кг/м³ [14].

Требуемая масса ДТТ типа Н, равная 120.6 кг, находилась по уравнению состояния идеального газа, заполняющего пространство в П при гидростатическом

давлении на глубине нахождения затонувшего объекта 300 м. При этом температура газов принималась равной температуре кипения при этом давлении, близкой к температуре «мокрого термометра». Размеры одной шашки выбирались исходя из опыта создания ПГУ диаметром $d_f = 0,28$ м и длиной $l_f = 0,25$ м, а ее масса достигала 24,6 кг, общее число шашек равно 5.

Исследование стадии вытеснения воды из резервуаров ОТГ показало, что интенсивность этого процесса зависит от отношения площади поверхности горения ОТГ к площади сечения горловины S_G , уровня охлаждения продуктов сгорания при их барботаже [1].

Графики зависимостей от времени массы газа, находящейся в П, при различных режимах функционирования ОТГ представлены на рис. 2. В первом варианте ОТГ работал непрерывно, влияние присоса груза к грунту не учитывалось. Поскольку площадь поверхности горения принята постоянной, то осушение П происходит при квазистационарном давлении. Перепад между давлением в П, создаваемым продуктами сгорания и окружающим, составлял 0,132 МПа, время полного вытеснения воды из П достигало 16 с (рис. 3). Всплытие начиналось на 8-й секунде (рис. 3 – 5), а заканчивалось на 36-й. К моменту полной продувки было израсходовано 80 кг ДТГ, что составляет 66,7 %. На стадии всплытия ОТГ продолжал работать и продукты сгорания, попав в понтон, затем истекали в воду.

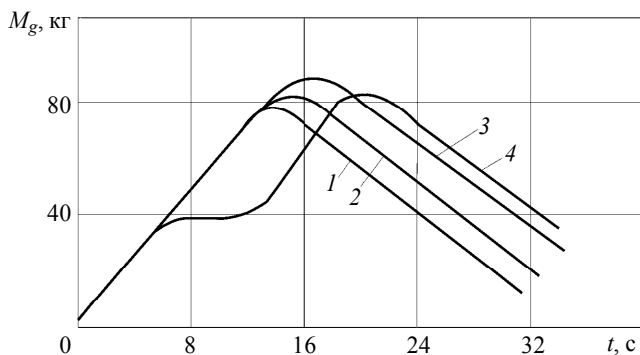


Рис. 2. Зависимость от времени массы газов, находящихся в отсеках П при различных режимах работы ОТГ

В варианте 2 габаритно-массовые характеристики ОТГ совпадали с вариантом 1, было учтено увеличение силы веса груза на 20 % за счет присоса его к грунту. Всплытие началось на 14-й секунде и происходило в динамическом режиме, так как превышение подъемной силы П над силой веса груза было больше, чем в первом варианте. В третьем варианте отключение ОТГ осуществлялось по достижению скорости всплытия системы, превышающей 0,1 м/с. При этом участок увеличения скорости ее всплытия сдвигался на 2–3 с вследствие прекращения подачи рабочего тела в понтон. В последнем варианте отключение ОТГ производилось в интервале времени от 6 до 12 с. На графических зависимостях массы газов и безразмерного объема от времени (рис. 2 и 3, кривые 4) видно последствие дискретной работы ОТГ – наличие «палочки» на упомянутых графиках. Отключение соответствовало объему, занимаемому газами (40 %). Прекращение подачи продуктов сгорания сопровождается быстрым снижением давления внутри П до окружающего, а истечение газов при полной продувке П вызывает падение

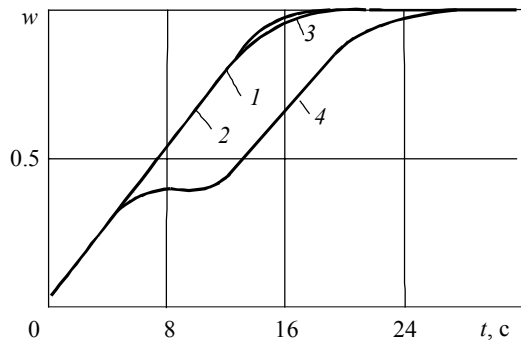


Рис. 3. Зависимость доли продутного объема от времени при различных режимах работы ОТГ

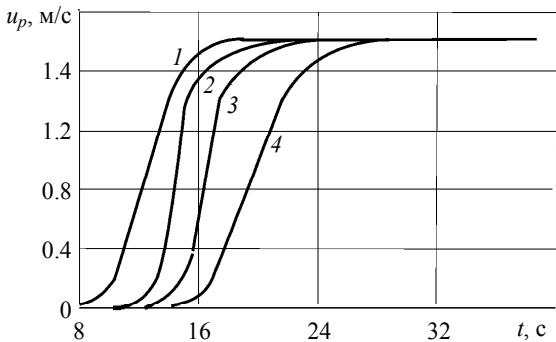


Рис. 4. Зависимость от времени скорости всплытия системы «П+Гз» при различных режимах работы ОТГ

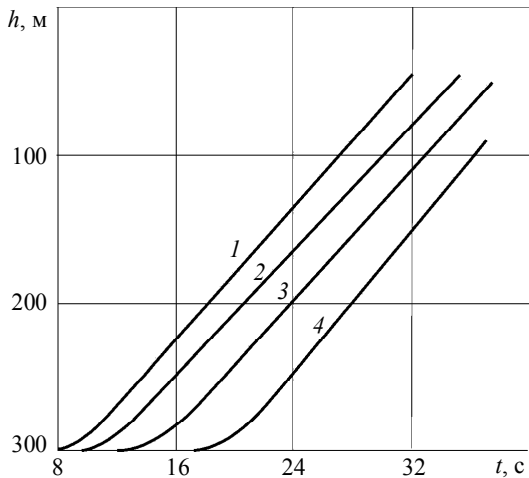


Рис. 5. Зависимость от времени текущей глубины системы «П+Гз» при различных режимах работы ОТГ

давления и возникновение некоторого разрежения внутри него. В модели и программе было предусмотрено поступление воды в цистерну в таких случаях.

Рассматриваемый прием дискретной продувки может быть использован для проверки качества крепления понтона к грузу. Уровень созданной подъемной силы к шестой секунде достаточен, чтобы понтон начал всплывать.

Интенсивность дальнейшего охлаждения продуктов сгорания, заполняющих создаваемую «подушку», мала, и потери сил Архимеда не являются существенными. Как отмечено в работе [6], при низкотемпературной продувке процесс снижения температуры газов до температуры воды составляет несколько минут.

В случае необходимости осуществления подъема груза с большей глубины можно только увеличить длины шашек.

Заключение

Разработана и реализована математическая модель ступенчатого подъема затонувших объектов при продувке понтона управляемым открытым твёрдотопливным газогенератором.

В ходе параметрического анализа установлено, что на стадии вытеснения воды из П можно выключать ОТГ многократно на несколько секунд. Добившись создания подъемной силы, необходимой для обеспечения начала всплытия системы «П + Г», можно отключить ОТГ. Предложенные мероприятия позволят сократить расход ДТТ на проведение операции.

Анализ полученных результатов показал, что после начала всплытия происходит самопродувка П, так как снижение внешнего (гидростатического) давления происходит быстрее, чем уменьшение давления газов в П из-за их охлаждения. С увеличением подъемной силы П интенсивность падения температуры уменьшается, поскольку коэффициент теплоотдачи за счет свободной конвекции обратно пропорционален диаметру П.

ЛИТЕРАТУРА

1. Барсуков В.Д., Голдаев С.В. Подводное зажигание и горение унитарных твердых топлив. Теория, эксперимент, технические приложения. Томск: Изд-во Том. ун-та, 2003. 352 с.
2. Марьяш В.И., Аксененко Д.Д. Автономные газогенераторы для средств подъема объектов с больших глубин // Изв. РАН. 2005. Вып. 1(42). С. 88–90.
3. Муру Н.П. Прикладные задачи плавучести и устойчивости судна. Л.: Судостроение, 1985. 212 с.
4. Патент 2357094 РФ Способ управления сжиганием унитарного твердого топлива в жидкой среде и газогенератор / Барсуков В.Д., Басалаев С.А., Голдаев С.В. и др. // Оpubл. в БИ. № 21 от 27.05.2009.
5. Барсуков В.Д., Басалаев С.А., Голдаев С.В. и др.. Способ управления подводным сжиганием УТГ с возможностью прерывания горения и повторного зажигания // Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики. Томск: Изд-во Том. ун-та, 2008. С. 59–60.
6. Барсуков В.Д., Басалаев С.А., Голдаев С.В. Возможность обеспечения регулируемой продувки балластной цистерны понтона открытым газогенератором // Изв. вузов. Физика. 2008. № 12/2. С. 31–35.
7. Барсуков В.Д., Басалаев С.А., Голдаев С.В., Минькова Н.П. Открытый газогенератор с многократным запуском для продувки глубоководного понтона // Химическая физика и мезоскопия. 2012. Т. 14. № 3. С. 327–334.
8. Беляев Н.М., Уваров Е.И., Степанчук Ю.М. Пневмогидравлические системы. Расчет и проектирование. М.: Высш. шк., 1988. 271 с.

9. Кутателадзе С.С. Теплопередача и гидравлическое сопротивление: Справочное пособие. М.: Энергоатомиздат, 1990. 367 с.
10. Райзберг Б.А., Ерохин Б.Т., Самсонов К.П. Основы теории рабочих процессов в реактивных системах на твердом топливе. М.: Машиностроение, 1972. 384 с.
11. Борьба с пожарами на судах: Справочное пособие в 2 т. Т. 1. Пожарная опасность на судах / под ред. М.Г. Ставицкого. Л.: Судостроение, 1976. 136 с.
12. Орлов Б.В., Мазинг Г.Ю. Термодинамические и баллистические основы проектирования ракетных двигателей на твердом топливе. М.: Машиностроение, 1979. 392 с.
13. Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике. М.: Наука, 1986. 608 с.
14. Вейткунский Я.И., Фалеев Ю.И., Федяевский К.К. Гидромеханика. Л.: Судостроение, 1982. 456 с.
15. Справочник по расчетам при судоподъеме. М.: Военное изд-во, 2005. 480 с.
16. Калиткин Н.Н. Численные методы. М.: Наука, 1978. 512 с.
17. Барсуков В.Д., Голдаев С.В., Минькова Н.П., Бабушкин Н.А. О закипания под водой двухосновного твердого топлива с термостойким стаканом спиралью накаливания средней мощности // Энергетика: эффективность, надежность, безопасность: Материалы Двадцатой Всероссийской научно-технической конференции: в 2 т. Т. 1. Томск: СПБ Графикс, 2014. С. 163–166.

Статья поступила: 02.12.2015 г.

Barsukov V., Goldaev S., Basalaev S., Babushkin N.A. SIMULATING THE RECOVERY OF SUNKEN OBJECTS BY BLOWING THE PONTOON BY A CONTROLLABLE SOLID FUEL GAS GENERATOR

DOI 10.17223/19988621/39/7

A mathematical model of raising sunken subjects using a pontoon blown by a controlled open gas generator (OG) with the possibility of temporary termination of its operation and the subsequent start is developed.

It is supposed that the pontoon has a cylindrical shape blown by a transverse water flow. Inside it, the OGs providing the blowing in the slugging regime are positioned. The volume flow from the tank into the environment was calculated by Bernoulli's equation. The heat exchange of combustion products with water and the tank wall was taken in the form of Newton. The task was reduced to a system of nonlinear ordinary differential equations representing the energy balance relations for the mass and energy of combustion products filling the variable volume; equations modeling the layer-by-layer combustion of the solid fuel and the flow of water from the ballast tank; and the closing equation of state of an ideal gas and dependences of the internal ballistics of the gas generators. The dependence of the linear speed of burning on pressure was accepted in the form of a power law. The considered pontoon – cargo system was replaced by a material point. Calculating the speed of its ascent was carried out by integrating the equation of nonuniform rectilinear motion of a rigid body in a viscous incompressible fluid.

In the course of the parametrical analysis, it was found that at the stage of water replacement from the ballast tank the OG can be stopped repeatedly for some seconds. After achieving the carrying power necessary to provide the beginning of emersion of the pontoon–cargo system, it is possible to disconnect the open gas generator. The proposed actions will allow one to reduce the solid fuel consumption for carrying out the operation.

Keywords: fluid, hydrostatic pressure, solid fuel, combustion area, the mass of fuel, sparging, gas generator, heat exchange, pontoon, Archimedes force, ascent rate.

BARSUKOV Vitaly Dementevich (Doctor of Technical Science, Prof., Tomsk State University, Scientific Research Institute of Applied Mathematics and Mechanics. Tomsk, Russian Federation)
E-mail: barsukov@niipmm.tsu.ru

GOLDAEV Sergey Vasilevich (Doctor of Physics and Mathematics, Prof., Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation)
E-mail: svgoldaev@rambler.ru

BASALAEV Sergey Aleksandrovich (Candidate of Physics and Mathematics, Tomsk State University, Scientific Research Institute of Applied Mathematics and Mechanics, Tomsk, Russian Federation)

E-mail: tarm@niipmm.tsu.ru

BABUSHKIN Nikita Aleksandrovich (Postgraduate, Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation)

E-mail: atikin89@tpu.ru

REFERENCES

1. Barsukov V.D., Goldaev S.V. *Podvodnoe zazhiganie i gorenie unitarnykh tverdykh topliv. Teoriya, eksperiment, tekhnicheskie prilozheniya*. Tomsk, Izd-vo Tom. un-ta, 2003. 352 p. (in Russian)
2. Mar'yash V.I., Aksenenko D.D. Avtonomnye gazogeneratory dlya sredstv pod"ema ob"ektov s bol'shikh glubin. *Izv. RARAN*, 2005, no. 1(42), pp. 88–90. (in Russian)
3. Muru N.P. *Prikladnye zadachi plavuchesti i ustoychivosti sudna*. Leningrad, Sudostroenie Publ., 1985. 212 p. (in Russian)
4. Patent 2357094 RF *Sposob upravleniya szhiganiem unitarnogo tverdogo topliva v zhidkoy srede i gazogenerator* / Barsukov V.D., Basalaev S.A., Goldaev S.V. et al. Opubl. v BI, no. 21 ot 27.05.2009. (in Russian)
5. Barsukov V.D., Basalaev S.A., Goldaev S.V. et al. Sposob upravleniya podvodnym szhiganiem UTT s vozmozhnost'yu preryvaniya goreniya i povtornogo zazhiganiya. *Fundamental'nye i prikladnye problemy sovremennoy mekhaniki*. Tomsk, Izd-vo Tom. un-ta, 2008, pp. 59–60. (in Russian)
6. Barsukov V.D., Basalaev S.A., Goldaev S.V. Vozmozhnost' obespecheniya reguliruemoy produvki ballastnoy tsisterny pontona otkrytym gazogeneratorom. *Izv. vuzov. Fizika*, 2008, no. 12/2, pp. 31–35. (in Russian)
7. Barsukov V.D., Basalaev S.A., Goldaev S.V., Min'kova N.P. Otkrytyy gazogenerator s mnogokratnym zapuskom dlya produvki glubokovodnogo pontona. *Khimicheskaya fizika i mezoskopiya*, 2012, vol. 14, no. 3, pp. 327–334. (in Russian)
8. Belyaev N.M., Uvarov E.I., Stepanchuk Yu.M. *Pnevmogidravlicheskie sistemy. Raschet i proektirovanie*. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1988. 271 p. (in Russian)
9. Kutateladze S.S. *Teploperedacha i gidravlicheskie soprotivleniye*. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1990. 367 p. (in Russian)
10. Rayzberg B.A., Erokhin B.T., Samsonov K.P. *Osnovy teorii rabochikh protsessov v reaktivnykh sistemakh na tverdom toplive*. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1972. 384 p. (in Russian)
11. *Bor'ba s pozharemi na sudakh, vol. 1. Pozharnaya opasnost' na sudakh* (ed. M.G. Stavitskiy). Leningrad, Sudostroenie Publ., 1976. 136 p. (in Russian)
12. Orlov B.V., Mazing G.Yu. *Termodinamicheskie i ballisticheskie osnovy proektirovaniya raketnykh dvigateley na tverdom toplive*. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1979. 392 p. (in Russian)
13. Bronshteyn I.N., Semendyaev K.A. *Spravochnik po matematike*. Moscow, Nauka Publ., 1986. 608 c. (in Russian)
14. Voytkunskiy Ya.I., Faleev Yu.I., Fedyavskiy K.K. *Gidromekhanika*. Leningrad, Sudostroenie Publ., 1982. 456 p. (in Russian)
15. *Spravochnik po raschetam pri sudopod"eme*. Moscow, Voennoe izd-vo Publ., 2005. 480 p. (in Russian)
16. Kalitkin N.N. *Chislennyye metody*. Moscow, Nauka Publ., 1978. 512 p. (in Russian)
17. Barsukov V.D., Goldaev S.V., Min'kova N.P., Babushkin N.A. O zazhiganiya pod vodoy dvukhosnovnogo tverdogo topliva s termostoykim stakanom spiral'yu nakalivaniya sredney moshchnosti. *Energetika: effektivnost', nadezhnost', bezopasnost': Materialy Dvadsatoy Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii, vol. 1*. Tomsk, SPB Grafiks Publ., 2014, pp. 163–166. (in Russian)