

Структура течения и гидродинамические воздействия на возвращаемый аппарат при посадке на воду

© А.О. Павлов

ПАО «РКК «Энергия», г. Королёв, Московская обл., 141070, Россия

Рассмотрен возвращаемый аппарат, входящий в состав пилотируемого транспортно-космического корабля нового поколения «Федерация» разработки ПАО «РКК «Энергия» в нештатной ситуации, когда на этапе выведения или спуска аппарат имеет возможность совершить посадку на водную поверхность с выключенной двигательной установкой. Проанализированы испытываемые аппаратом воздействия со стороны среды, необходимые для формулирования требований к прочности конструкции и для анализа допустимости испытываемых экипажем перегрузок при таком режиме посадки. Представлены результаты компьютерного моделирования процесса посадки возвращаемого аппарата с неработающей двигательной установкой на спокойную водную поверхность при вариации входных динамических параметров: угол входа в воду и горизонтальная скорость. Приведены кинематические и нагрузочные характеристики возвращаемого аппарата.

Ключевые слова: посадка на воду, возвращаемый аппарат, компьютерное моделирование

Введение. В настоящее время в ПАО «РКК «Энергия» ведется разработка пилотируемого транспортно-космического корабля нового поколения (ПТК НП) «Федерация». В состав корабля входит возвращаемый аппарат (ВА), предназначенный для возвращения космонавтов на Землю (рис. 1), который оснащен парашютно-реактивной системой мягкой посадки, снижающей перегрузки, испытываемые экипажем на заключительном этапе спуска [1].

В штатной ситуации ВА совершает посадку на сухопутную равнинную безлесную поверхность, допустимый наклон которой лежит в пределах 10° . На последнем участке спуска он движется на парашютах с постоянной скоростью ~ 8 м/с. В полете раскрываются опоры посадочного устройства (ПУ) (см. рис. 1). На высоте 5–15 м над поверхностью посадки в работу включаются сопла посадочной твердотопливной двигательной установки (ПТДУ) вертикального торможения. Отстрел парашютов происходит только после уменьшения вертикальной составляющей скорости V_B до 2,5 м/с. Включаются сопла ПТДУ горизонтального торможения и работают до полного гашения горизонтальной составляющей скорости V_T . При соблюдении штатного режима посадки на момент приземления $V_B \leq 1,5$, а $V_T \leq 0,5$ м/с [2].



Рис. 1. Модель ВА без двигательной установки:
 1 — парашютный контейнер; 2 — экран агрегатного отсека;
 3 — опоры посадочного устройства

При возникновении нештатной ситуации ВА может совершить посадку на водную поверхность, в том числе с неработающей ПТДУ. При таком режиме посадки V_B равна скорости снижения ВА на парашютах и может достигать 8 м/с. Горизонтальная же компонента скорости аппарата V_T может достигать до 15 м/с. Угол входа в воду ВА на момент приводнения может лежать в пределах $\varphi_\alpha = 15 \dots 30^\circ$. Раскрытие опор ПУ блокируется.

Данный режим посадки с точки зрения нагружения конструкции является расчетным, в нем некомпенсированная скорость аппарата достигает своих максимальных значений. К дополнительному увеличению гидродинамических воздействий на аппарат приводит наличие волн в месте посадки.

Цели исследования — формулирование требований к прочности конструкции и анализ допустимости испытываемых экипажем перегрузок при посадке на водную поверхность с выключенным двигателем.

Задача определения воздействий на тело, входящее в воду, успешно решается теоретическими, эмпирическими и численными методами для тел простой формы [3]. Однако ввиду сложности внешних обводов ВА (тело с двумя плоскостями симметрии и нетривиальной формой нижней поверхности) оценки с использованием традиционных методов не дают корректного результата при больших пределах вариации входных параметров.

Одним из основных способов ведения проектных исследований в ПАО «РКК «Энергия» является компьютерное моделирование аэрогазодинамических процессов в специализированных программных комплексах (ПК) с предварительной их верификацией и валидацией [4]. Необходимые характеристики ВА можно определить с помощью компьютерного моделирования процесса посадки в ПК FlowVision, обладающем рядом преимуществ в решении задачи посадки на воду [5]. Перед использованием ПК FlowVision была также осуществлена его валидация путем сравнения расчетных характеристик с экспериментальными данными по посадке возвращаемого модуля корабля Apollo и модели ВА ПТК, показавшая удовлетворительное их согласование [6].

В данной статье приведены результаты моделирования процесса посадки ВА на спокойную (без волнения) водную поверхность с $V_B = 8$ м/с при вариации угла входа в воду φ_α и горизонтальной скорости V_T . Представлены величины воздействий на экран агрегатного отсека (АО) ВА (см. рис. 1), его динамические характеристики, а также кинограмма движения ВА в воде.

Постановка задачи. Процесс создания модели в ПК FlowVision включает в себя создание расчетной области (РО), задание начальных и граничных условий, параметров расчетной сетки и солвера [7].

Для моделирования двухфазных течений в программном комплексе FlowVision реализован модифицированный метод объема жидкости (от англ. volume of fluid, VOF), а для моделирования движения ВА в среде — метод «подвижное тело» [7].

Геометрия расчетной области представляет собой параллелепипед размерами $25 \times 20 \times 20$ м (рис. 2). Высота области выбрана таким образом, чтобы исключить возмущения, распространяющиеся в водной фазе от нижней границы РО.

В ПК FlowVision использованы два вида систем координат [7]: глобальная (ГСК) $OX_{FV}Y_{FV}Z_{FV}$ с центром на границе водораздела, принадлежащая РО, и локальная (ЛСК) $OXYZ$, связанная с ВА. Центр масс ВА смещен относительно оси симметрии аппарата в сторону парашютного контейнера, его положение задано в ЛСК. Кинематические характеристики: положение центра масс ($X_{ЦМ}$, $Y_{ЦМ}$, $Z_{ЦМ}$) и скорость аппарата определены относительно ГСК, аэродинамические силы и моменты, действующие на ВА, — в ЛСК.

В начале расчета РО заполняют две фазы: верхние 2/5 области — воздухом, оставшуюся часть — водой. Возвращаемый аппарат расположен на небольшой высоте над поверхностью водораздела. С помощью модификатора «Подвижное тело» задают массово-инерционные характеристики аппарата, а также начальную вертикальную

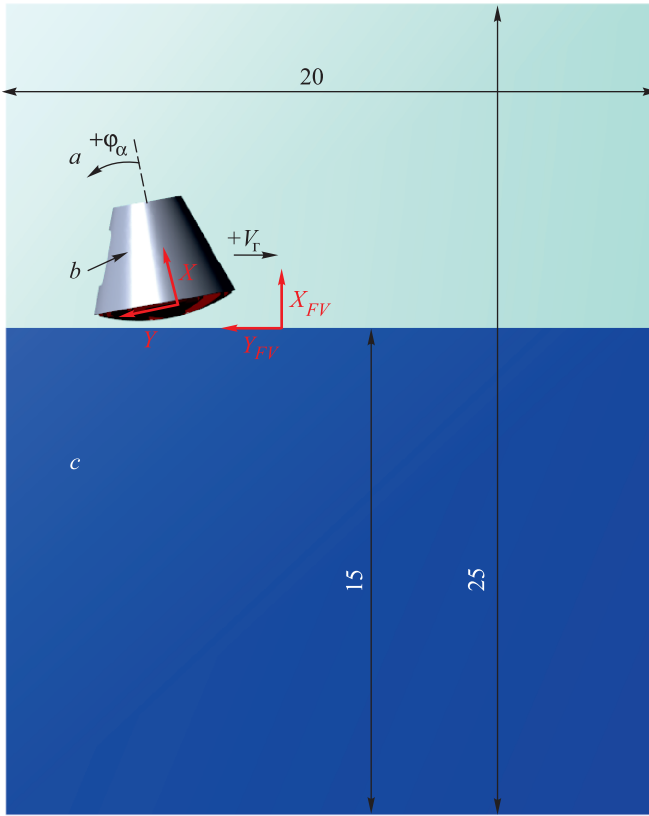


Рис. 2. Расчетная область и системы координат ($X_{FV}Y_{FV}$ — глобальная, XY — локальная); граничные условия:
 a — «вход — выход» с $VOF_{\text{возд}} = 1$; b — «стенка»;
 c — «вход — выход» с $VOF_{\text{H}_2\text{O}} = 1$

компоненту скорости аппарата $V_b = 7,9$ м/с в отрицательном направлении OX_{FV} и горизонтальную компоненту V_Γ в отрицательном направлении OY_{FV} . В расчетах, где ВА обладает ненулевой V_Γ , его начальное положение смещено вдоль положительного направления OY_{FV} .

Для расчета используются несколько типов граничных условий (ГУ) [7]: на верхней границе РО задают ГУ «свободный выход» со значением $VOF_{\text{возд}} = 1$; на боковых границах — ГУ «вход — выход» с равной единице переменной VOF соответствующей среды (см. рис. 2); на нижней границе ГУ «вход — выход» с $VOF_{\text{H}_2\text{O}} = 1$. Моделирование гидростатики осуществлено заданием давления на ГУ с ненулевым $VOF_{\text{H}_2\text{O}}$ по формуле $p = -\rho g \cdot \text{COORD}_X$, где

ρ — плотность воды; g — гравитационное ускорение; $COORD_X$ — координата X в ГСК.

На модели ВА необходимо установить ГУ «стенка», разделить поверхность аппарата на супергруппы, соответствующие различным частям аппарата (экран АО, парашютный контейнер, обратный конус, донная поверхность). В процессе расчета определяют давление, действующее на каждую из супергрупп в отдельности.

Используется неравномерная расчетная сетка (рис. 3). В области приводнения производится ее объемная адаптация (сгущение) второго уровня. Минимальный размер ячейки до адаптации составляет 0,05 м, после адаптации — 0,0125 м. Максимальный размер ячейки — 0,25 м.

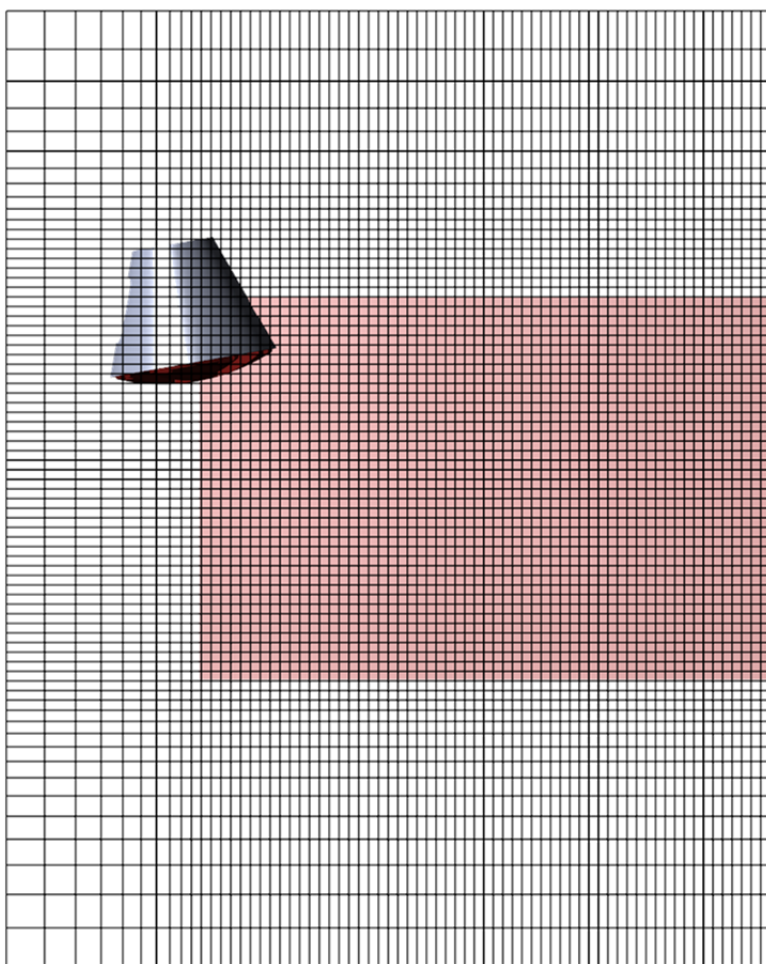


Рис. 3. Расчетная сетка
(красным цветом выделена область с адаптацией второго уровня)

Размер расчетной сетки меняется в процессе расчета вследствие движения аппарата и свободной поверхности. Размер сетки до адаптации составляет 282 072 ячейки, после проведения адаптации — порядка 5,6 млн ячеек.

Для расчетов введены следующие параметры солвера. Использована схема типа «неявная новая» 2-го порядка точности [7]. Шаг по времени задан числами Куранта — Фридрихса — Леви: конвективным $CFL_{\text{конв}} = 2$ и поверхностным $CFL_{\text{пов}} = 1$. Максимальный шаг по времени равен 0,05 с. Вследствие неравномерности расчетной сетки среда принята неконсервативной. Для учета турбулентности используется стандартная $k - \varepsilon$ -модель.

Моделируются 2 с процесса посадки. Для недопущения вылета ВА за пределы РО проводится автоматическая остановка расчета при приближении центра масс аппарата на расстояние 4 м к границе РО.

В качестве расчетных ресурсов для решения задачи использован кластер, в узлах которого два четырехъядерных процессора Intel Core i5 с тактовой частотой 2,8 ГГц. Среднее время моделирования 2 с посадки в одном расчетном случае при использовании 16 узлов составляет сутки.

В рассматриваемой задаче вариационными параметрами являются угол входа в воду ВА φ_α и его горизонтальная скорость V_r (рис. 4). В данной статье представлены результаты 16 расчетов со значениями $\varphi_\alpha = \{0, 5, 10, 15\}$ град и $V_r = \{0, 5, 10, 15\}$ м/с.

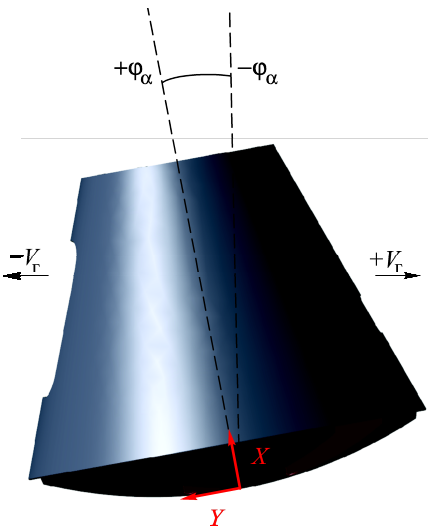


Рис. 4. Вариационные параметры в задаче и их сигнатура относительно ЛСК

Предварительные исследования. Помимо валидации ПК FlowVision проведено исследование сходимости по сетке наблюдаемых характеристик, по результатам которого определена размерность используемой сетки и метод обработки расчетных данных. Основные отличия постановки задачи в исследовании сеточной сходимости следующие:

- скорость снижения ВА $V_B = 9,8$ м/с, что соответствует нештатной ситуации, в которой один из куполов парашютной системы не раскрылся;
- горизонтальная скорость $V_r = 0$;

- варьируется только угол входа в воду φ_α ;
- размерность сетки зависит от уровня адаптации вблизи области приводнения ВА (рис. 5).

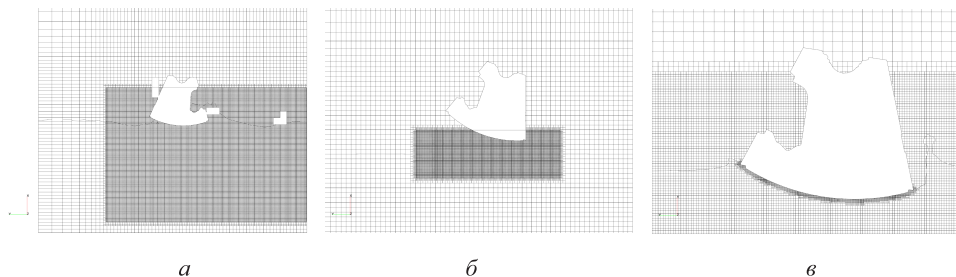


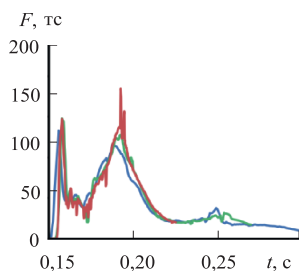
Рис. 5. Фрагменты расчетных сеток после проведения адаптации в исследовании сеточной сходимости:

a — сетка «адаптация 1» (5,6 млн ячеек); *б* — сетка «адаптация 2» (5,9 млн ячеек);
в — сетка «адаптация 3» (6,2 млн ячеек)

Проведено сравнение значений гидродинамической продольной силы, действующей на экран АО. Для проверки наличия сходимости по сетке сравнена величина продольной силы в момент достижения 1-го максимума этой величины на сетке «адаптация 1» $t_{\max,1}$ при различных углах входа в воду на указанных сетках (рис. 6); 2-й максимум соответствует взаимодействию водной среды с нишами и рассмотрен не был.

Рис. 6. Значения продольной силы F , действующей на экран АО при посадке с $V_B = 9,8$ м/с, $V_T = 0$, $\varphi_\alpha = 15^\circ$, полученные в результате усреднения на сетке:

— адаптация 1; — адаптация 2;
 — адаптация 3



Характеристики, получаемые в процессе расчета, записывают на каждом временном шаге, они содержат шумы, возникающие вследствие особенностей расчетных методов (см. рис. 6). Для устранения влияния случайных всплесков было проведено усреднение получаемых данных методом «скользящее среднее». Выявлено, что для достижения сеточной сходимости требуется усреднение характеристик по пяти временным точкам (рис. 7). Показано, что используемая расчетная сетка имеет достаточную размерность. В дальнейшем все характеристики приведены в усредненном виде.

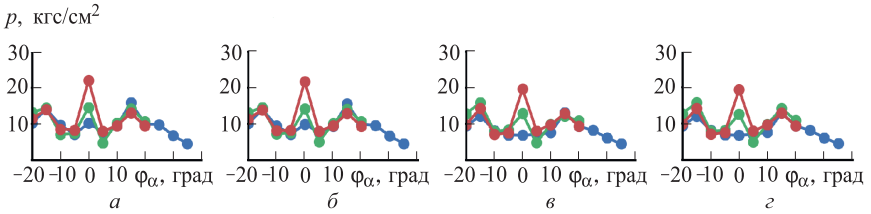


Рис. 7. Значения давления на смачиваемую поверхность экрана АО в момент времени $t_{\max,1}$ при различных углах входа ВА в момент входа в воду со скоростью 9,8 м/с, полученные в результате усреднения по двум (а), трем (б), четырем (в) и пяти (г) точкам на сетке:
 —●— адаптация 1; —●— адаптация 2; —●— адаптация 3

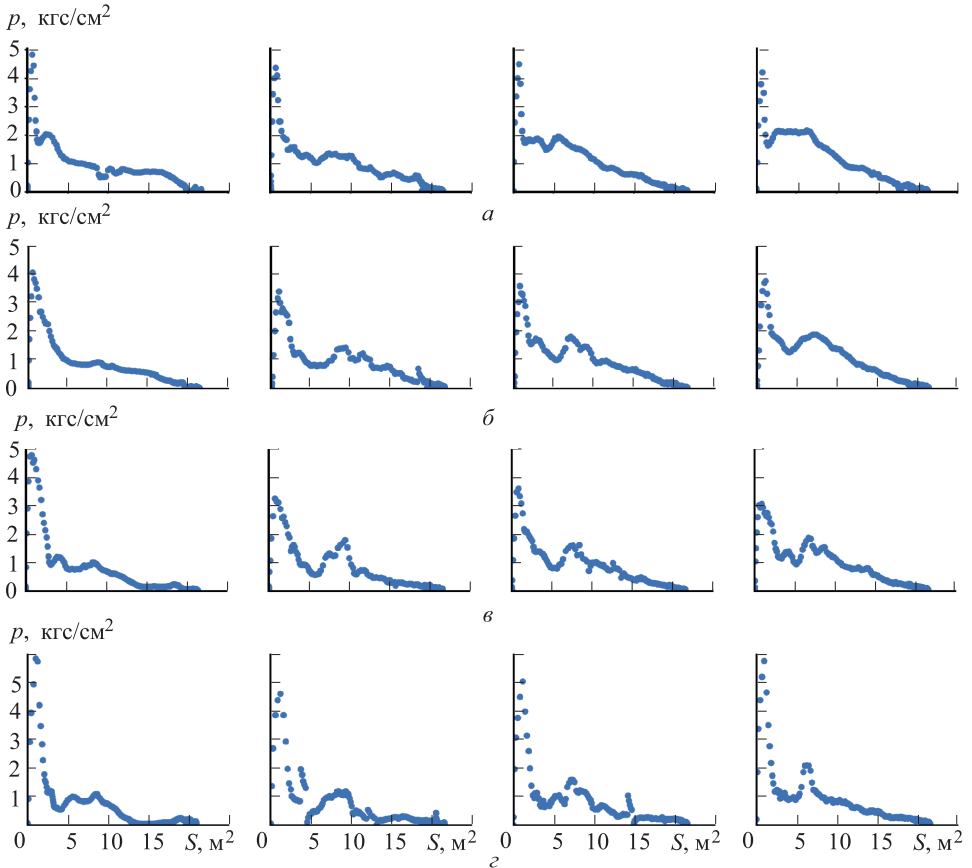


Рис. 8. Средние значения давления p , действующего на площадь S смачиваемой поверхности экрана АО при (слева направо) V_r , равной 0, 5, 10, 15 м/с:

$$a - \varphi_\alpha = 0^\circ; \quad б - \varphi_\alpha = 5^\circ; \quad в - \varphi_\alpha = 10^\circ; \quad г - \varphi_\alpha = 15^\circ$$

Результаты моделирования. Среди характеристик, полученных в процессе моделирования, наибольший интерес представляет значение давления на смачиваемую поверхность экрана АО (среднего давления p на погруженный в воду участок тела), поскольку именно этот участок поверхности испытывает максимальные воздействия при посадке (рис. 8).

Выявлено, что при любых сочетаниях варьируемых параметров средняя величина давления на экран не превышает 6 кгс/см^2 . В большинстве случаев помимо первого пика давления, возникающего при касании ВА водной поверхности, наблюдается второй пик, который возникает из-за воздействия воды на стенки ниш ПУ, давление в которых достигает 2 кгс/см^2 . Также интерес представляет оценка перегрузок, испытываемых экипажем (рис. 9), и динамика движения аппарата (рис. 10, 11).

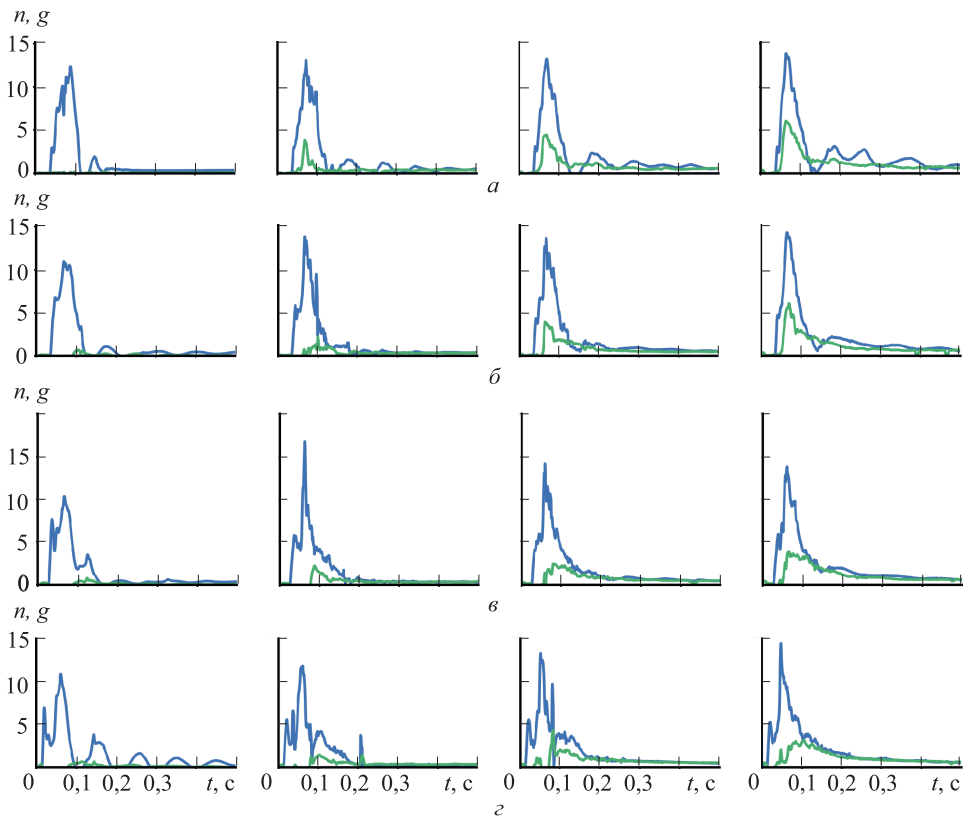


Рис. 9. Осевая (—) и поперечная (—) перегрузки n_x , действующие на ВА при (слева направо) V_r , равной 0, 5, 10, 15 м/с:

a — $\varphi_\alpha = 0^\circ$; b — $\varphi_\alpha = 5^\circ$; $в$ — $\varphi_\alpha = 10^\circ$; $г$ — $\varphi_\alpha = 15^\circ$

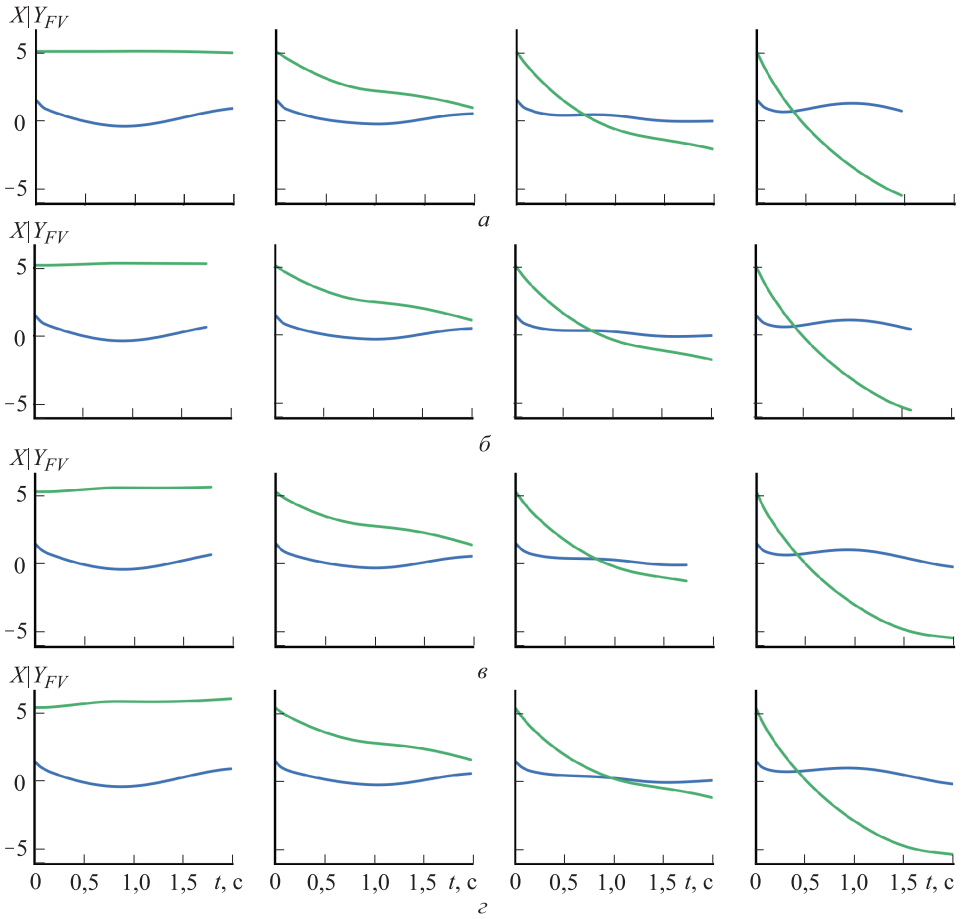


Рис. 10. Координата центра масс X_{CM} (—) и Y_{CM} (—) в ГСК в расчетах при (слева направо) V_r , равной 0, 5, 10, 15 м/с:
a — $\varphi_\alpha = 0^\circ$; *б* — $\varphi_\alpha = 5^\circ$; *в* — $\varphi_\alpha = 10^\circ$; *г* — $\varphi_\alpha = 15^\circ$

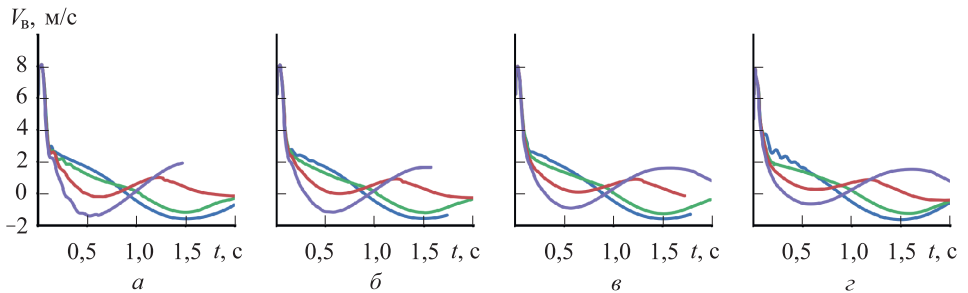


Рис. 11. Скорость центра масс в ГСК в расчетах при $\varphi_\alpha = 0^\circ$ (*a*), $\varphi_\alpha = 5^\circ$ (*б*), $\varphi_\alpha = 10^\circ$ (*в*) и $\varphi_\alpha = 15^\circ$ (*г*) и значениях V_r , м/с:
 — — 0; — — 5; — — 10; — — 15

Выявлено, что перегрузки при посадке на воду достигают $18g$ в осевом направлении и $7g$ в поперечном.

С ростом угла входа в исследованном диапазоне $\varphi_\alpha = 0 \dots 15^\circ$ пиковое значение давления на смачиваемую поверхность экрана АО уменьшается (см. рис. 8), а осевая перегрузка возрастает (см. рис. 9).

Картина движения ВА в воде значительно меняется при вариации входных параметров. На динамические характеристики ВА влияет также и взаимная сигнатура φ_α и V_r . Для демонстрации различий представлены кинограммы посадки ВА с $\varphi_\alpha = \pm 15^\circ$ и $V_r = 10$ м/с (рис. 12).

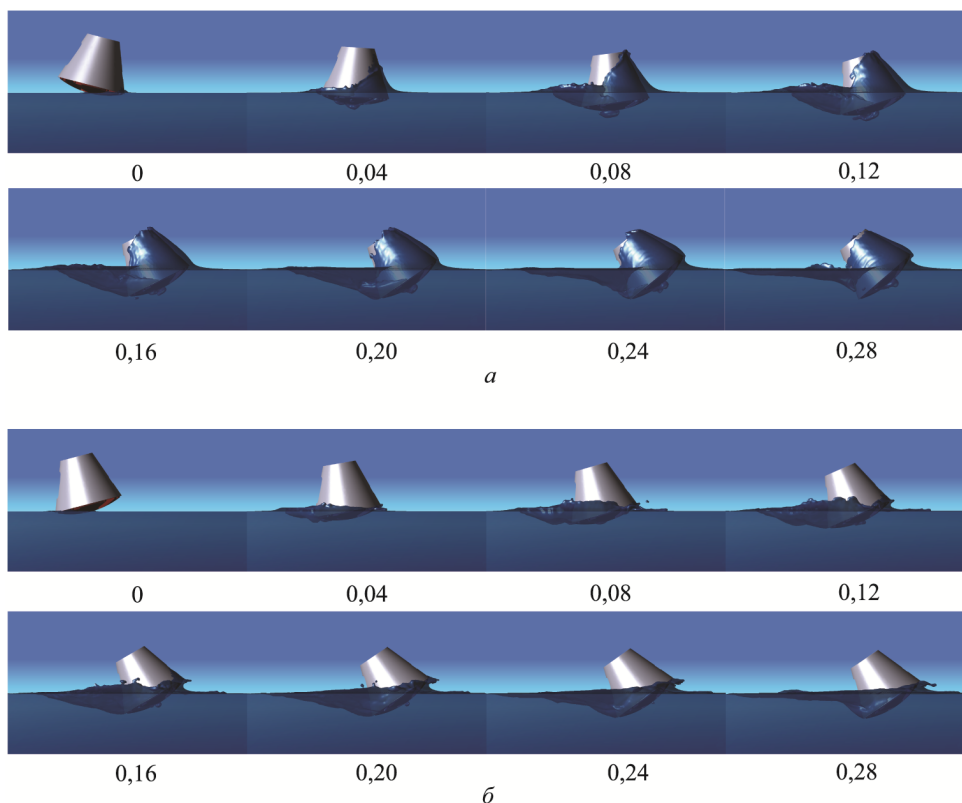


Рис. 12. Кинограмма посадки ВА с $V_r = 10$ м/с, $\varphi_\alpha = -15^\circ$ (а) и $\varphi_\alpha = 15^\circ$ (б)
(под рисунками приведен шаг по времени, с)

Видно, что при положительных значениях угла φ_α входа в воду поверхность обратного конуса ВА испытывает меньшие воздействия со стороны водной среды, чем в случаях посадки на воду с отрицательным углом входа.

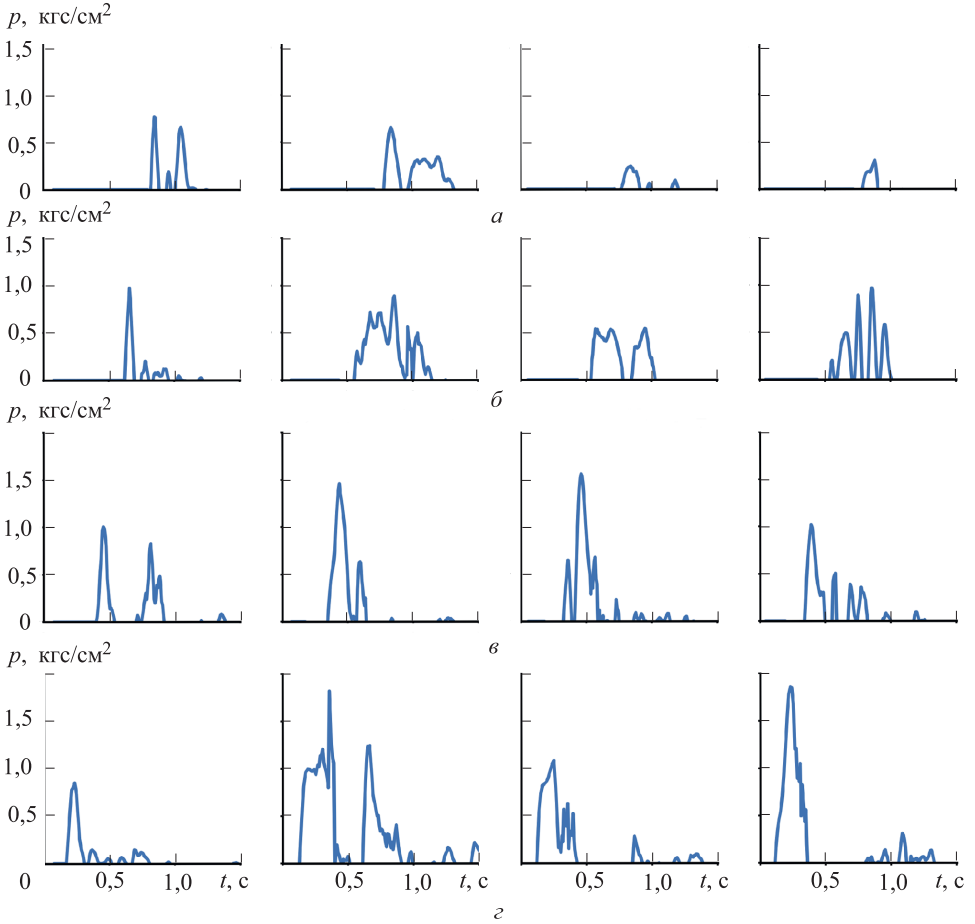


Рис. 13. Средние значения давления p , реализующиеся на боковой смачиваемой поверхности ВА при (слева направо) V_r , равной 0, 5, 10, 15 м/с:

$$a - \varphi_\alpha = 0^\circ; \quad б - \varphi_\alpha = 5^\circ; \quad в - \varphi_\alpha = 10^\circ; \quad г - \varphi_\alpha = 15^\circ$$

В рассмотренном диапазоне на боковой поверхности ВА реализуются значения p до 2 кгс/см^2 (рис. 13) на площадь S , не превышающую $0,2 \text{ м}^2$.

Закключение. Определены гидродинамические воздействия на ВА при посадке на воду в нештатной ситуации при вариации начальных параметров движения. Проведенные исследования показали, что в случае посадки на воду при отсутствии волнения средние значения p на смачиваемую поверхность экрана АО могут достигать 6 кгс/см^2 , а в нишах ПУ — 2 кгс/см^2 . Этот случай посадки является расчетным при анализе нагружения конструкции ВА. Результаты исследования могут быть использованы для дальнейшего выдвигания требований к прочности конструкции.

Максимальные значения давления на поверхности экрана АО достигаются при нулевых значениях углов входа φ_α , реализуются в начальные моменты приводнения ВА и действуют на ограниченную площадь смачиваемой поверхности $S \sim 1,0 \dots 1,5 \text{ м}^2$. С ростом угла входа φ_α пиковые значения давления на поверхности экрана уменьшаются, а осевые перегрузки n_x возрастают.

На последующих этапах исследований требуется проведение расчетов в условиях морского волнения и более широком диапазоне изменения начальных кинематических параметров φ_α и V_r .

Автор выражает признательность своим научным руководителям А.А. Дядькину и Т.В. Симаковой за помощь и консультации по постановке задачи и проведению исследования.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Антонова Н.П., Брюханов Н.А., Четкин С.В. Средства посадки пилотируемого транспортного корабля нового поколения. *Космическая техника и технологии*, 2014, № 4, с. 21–30.
- [2] Ильющенко Л.А., Ильющенко И.С. Построение алгоритма управления парашютно-реактивной посадкой ВА ПТК НП. *Сб. тр. 59 науч. конф. МФТИ. Королёв, 24 ноября 2016 г., МФТИ*. Москва, Изд-во МФТИ, 2016, с. 112.
- [3] Seddon C.M., Moatamedi M. Review of water entry with applications to aerospace structures. *International Journal of Impact Engineering*, 2006, vol. 32, pp. 1045–1067.
- [4] Алабова Н.П., Брюханов Н.А., Дядькин А.А., Крылов А.Н., Симакова Т.В. Роль компьютерного моделирования и физического эксперимента в исследованиях аэрогазодинамики ракетно-космических систем в процессе проектирования. *Космическая техника и технологии*, 2014, № 3, с. 14–21.
- [5] Аксёнов А.А., Дядькин А.А., Павлов А.О., Симакова Т.В., Скороваров А.Ю., Щеляев А.Е. Расчетные исследования гидродинамических воздействий на возвращаемый аппарат при посадке на водную поверхность. *Космическая техника и технологии*, 2016, № 3, с. 5–14.
- [6] Дядькин А.А., Павлов А.О., Симакова Т.В., Четкин С.В. Анализ возможности использования программного комплекса FlowVision для исследования гидродинамических воздействий на возвращаемый аппарат и динамики его движения при посадке на воду. *Сб. тр. междунар. форума «Инженерные системы – 2016», Москва, 4–5 апреля 2016 г., ООО «ТЕСИС»*. Москва, Изд-во ООО «МАКС Пресс», 2016, с. 57–66.
- [7] *FlowVision. Руководство пользователя*. Москва, ООО «ТЕСИС», 2015, 1271 с.

Статья поступила в редакцию 30.03.2017

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Павлов А.О. Структура течения и гидродинамические воздействия на возвращаемый аппарат при посадке на воду. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2017, вып. 7.

<http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2017-7-1660>

Статья подготовлена по материалам доклада, представленного на XLI Академических чтениях по космонавтике, посвященных памяти академика С.П. Королёва и других выдающихся отечественных ученых — пионеров освоения космического пространства. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 24–27 января 2017 г.

Павлов Александр Олегович — инженер ПАО «РКК «Энергия». Область научных интересов: вычислительная гидрогазодинамика.
e-mail: aleksandr.pavlov40@rsce.ru

Flow structure and hydrodynamic impacts on the return vehicle at the touch-down onto the water surface

© A.O. Pavlov

S.P. Korolev Rocket and Space Public Corporation Energia,
Korolev town, Moscow Region, 141070, Russia

The article describes a return vehicle, which forms part of the new generation crew transfer spacecraft “Federation” designed by RSC Energia, in the contingency situation when at the stage of leading out or reentry this vehicle has an opportunity to make a touch-down onto the water surface with the propulsion module switched off. We examine the environmental impact on the vehicle to formulate the structure integrity requirements and to analyze the acceptability of the stresses endured by the crew in such landing conditions. The article looks at the results of computerized simulation of the return vehicle touch-down process when the vehicle with the propulsion module switched off touches the smooth water surface through variation of entering dynamic parameters such as the angle of entry into the water and the horizontal velocity. We show kinematic and load characteristics of the return vehicle.

Keywords: touch-down onto the water, return vehicle, computerized simulation

REFERENCES

- [1] Antonova N.P., Bryukhanov N.A., Chetkin S.V. *Kosmicheskaya tekhnika i tekhnologii — Space Engineering and Technology*, 2014, no. 4, pp. 21–30.
- [2] Ilyushchenko L.A., Ilyushchenko I.S. Postroeniye algoritma upravleniya parashyutno-reaktivnoy posadkoy VA PTK NP [Algorithm development for the parachute-jet touchdown of the perspective new generation crew transfer vehicle]. *Sbornik trudov 59-y nauchnoy konferentsii MFTI* [Proc. of the 59th scientific conference of Moscow Institute of Physics and Technology]. Moscow, MIPT Publ., 2016, p. 112.
- [3] Seddon C.M., Moatamedi M. *International Journal of Impact Engineering*, 2006, vol. 32, pp. 1045–1067.
- [4] Alabova N.P., Bryukhanov N.A., Dyadkin A.A., Krylov A.N., Simakova T.V. *Kosmicheskaya tekhnika i tekhnologii — Space Engineering and Technology*, 2014, no. 3, pp. 14–21.
- [5] Aksenov A.A., Dyadkin A.A., Pavlov A.O., Simakova T.V., Skorovarov A.Yu., Shchelyayev A.E. *Kosmicheskaya tekhnika i tekhnologii — Space Engineering and Technology*, 2016, no. 3, pp. 5–14.
- [6] Dyadkin A.A., Pavlov A.O., Simakova T.V., Chetkin S.V. Analiz vozmozhnosti ispolzovaniya programmogo kompleksa FlowVision dlya issledovaniya gidrodinamicheskikh vozdeystviy na vozvrashchayemyy apparat i dinamiki yego dvizheniya pri posadke na vodu [Analysis of the opportunity to use the software package FlowVision for researching hydrodynamic impacts on the return vehicle and its dynamic motion at the touch-down onto the water surface]. *Sbornik trudov mezhdunar. foruma “Inzhenernyye sistemy–2016”*, Moskva, 4–5 aprelya 2016 g., OOO “TESIS” [Proc. of the international forum “engineering systems – 2016”, Moscow, April 4-5, TESIS, Ltd]. Moscow, MAKS-Press Publ., 2016, pp. 57–66.

- [7] *FlowVision. Rukovodstvo polzovatelya. Versiya 3.09.05.* [FlowVision. User Manual. Version 3.09.05]. Moscow, TESIS, Ltd. Publ., 2015, 1271 p.

Pavlov A.O., engineer of S.P. Korolev Rocket and Space Public Corporation Energia. Research interests include: computational fluid dynamics.
e-mail: aleksandr.pavlov40@rsce.ru