

УДК: 629.78.087:532.58

## Расчет гидродинамических воздействий на возвращаемый аппарат при посадке на воду

В. В. Жаркова<sup>1,a</sup>, А. Е. Щеляев<sup>1,a</sup>, А. А. Дядькин<sup>2,b</sup>,  
А. О. Павлов<sup>2,b</sup>, Т. В. Симакова<sup>2,b</sup>

<sup>1</sup> ООО «ТЕСИС»,  
Россия, 127083, г. Москва, ул. Юннатов, д. 18

<sup>2</sup> РКК «Энергия»,  
Россия, 141070, Московская область, г. Королев, ул. Ленина, д. 4а

E-mail: <sup>a</sup> info@tesis.com.ru, <sup>b</sup> post@rsce.ru

*Получено 01.11.2016, после доработки — 21.12.2016.*

*Принято к публикации 30.12.2016.*

В работе представлены результаты моделирования расчетных случаев приводнения возвращаемого аппарата (ВА) пилотируемого транспортного корабля нового поколения в условиях штиля. Рассмотрены случаи посадки ВА с работающими и с выключенными двигательными установками.

Задача приводнения ВА моделировалась в рамках двухфазной постановки с наличием двух несмешивающихся фаз: воды и газа, состоящего из воздуха и продуктов сгорания, поступающих из двигательной установки. Параметры течения в каждой фазе резко отличаются друг от друга по величине плотности и скорости распространения звука. Истечение продуктов сгорания из сопловых установок характеризуется высокими скоростями и давлениями, что усложняет задачу, по сравнению со свободным падением ВА в воду. В расчетах используется упрощение постановки задачи, в котором при взаимодействии горячих струй с водой кипение, испарение и образование водяного пара не учитываются. Газовые струи только нагревают и вытесняют воду.

Для моделирования переноса межфазных границ применяется метод VOF (Volume of fluid), где перенос контактной поверхности описывается конвективным уравнением, а поверхностное натяжение на межфазной границе учитывается давлением Лапласа. Ключевой особенностью метода является расщепление поверхностных ячеек, куда заносятся данные соответствующей фазы. Уравнения для обеих фаз (уравнения неразрывности, импульса, энергии и другие) в поверхностных ячейках решаются совместно.

Моделирование приводнения ВА занимает длительное время, что связано с особенностями явного расчета уровня границы раздела фаз (свободной поверхности). Для получения качественных результатов свободная поверхность должна быть разрешена большим количеством расчетных ячеек, но при этом за один шаг интегрирования перемещаться не более чем на одну ячейку.

В процессе приземления исследовались гидродинамическое воздействие на ВА, динамика его движения и остойчивость ВА после приводнения, оценивались продольные перегрузки. Полученные данные использовались для анализа нагружения и прочности конструкции корпуса ВА, а также его отдельных элементов.

Ключевые слова: FlowVision, численное моделирование, приводнение, возвращаемый аппарат, метод VOF, двухфазная постановка, перенос межфазных границ, аэродинамические характеристики, динамика движения

UDC: 629.78.087:532.58

## The calculation of hydrodynamic impact on reentry vehicle during splashdown

V. V. Zharkova<sup>1,a</sup>, A. E. Shchelyaev<sup>1,a</sup>, A. A. Dyadkin<sup>2,b</sup>,  
A. O. Pavlov<sup>2,b</sup>, T. V. Simakova<sup>2,b</sup>

<sup>1</sup> Ltd. «TESIS»,

18 Yunnatov st., Moscow, 127083, Russia

<sup>2</sup> RSC Energia,

4A Lenin st., Korolev, Moscow region, 141070, Russia

E-mail: <sup>a</sup> info@tesis.com.ru, <sup>b</sup> post@rsce.ru

*Received 01.11.2016, after completion — 21.12.2016.*

*Accepted for publication 30.12.2016.*

The reentry vehicle of the transportation spacecraft that is being created by RSC Energia in regular mode makes soft landing on land surface using a parachute system and thruster devices. But in not standard situations the reentry vehicle also is capable of executing a splashdown. In that case, it becomes important to define the hydrodynamics impact on the reentry vehicle at the moment of the first contact with the surface of water and during submersion into water medium, and to study the dynamics of the vehicle behavior at more recent moments of time.

This article presents results of numerical studies of hydrodynamics forces on the conical vehicle during splashdown, done with the FlowVision software. The paper reviews the cases of the splashdown with inactive solid rocket motors on calm sea and the cases with interactions between rocket jets and the water surface. It presents data on the allocation of pressure on the vehicle in the process of the vehicle immersion into water medium and dynamics of the vehicle behavior after splashdown. The paper also shows flow structures in the area of the reentry vehicle at the different moments of time, and integral forces and moments acting on the vehicle.

For simulation process with moving interphases in the FlowVision software realized the model VOF (volume of fluid). Transfer of the phase boundary is described by the equation of volume fraction of this continuous phase in a computational cell. Transfer contact surface is described by the convection equation, and at the surface tension is taken into account by the Laplace pressure. Key features of the method is the splitting surface cells where data is entered the corresponding phase. Equations for both phases (like the equations of continuity, momentum, energy and others) in the surface cells are accounted jointly.

**Keywords:** FlowVision, numerical simulation, splashdown, re-entry vehicle, VOF-method, two-phase simulation, transfer of interphase boundaries, aerodynamic properties, dynamic motion.

Citation: *Computer Research and Modeling*, 2017, vol. 9, no. 1, pp. 37–46 (Russian).

## Введение

Задача приводнения возвращаемого аппарата (ВА) пилотируемого транспортного корабля (ПТК) является одной из сложнейших задач, решаемых в промышленности на сегодняшний день. Постановка задачи объединяет в себе решение уравнений движения сжимаемой и несжимаемой среды, уравнения межфазного взаимодействия и уравнения движения жесткого тела. Основной особенностью задачи является взаимодействие реактивной струи с водной средой.

Возвращаемый аппарат показан на рис. 1. Схематично он представляет собой усеченный конус со сферическим дном.

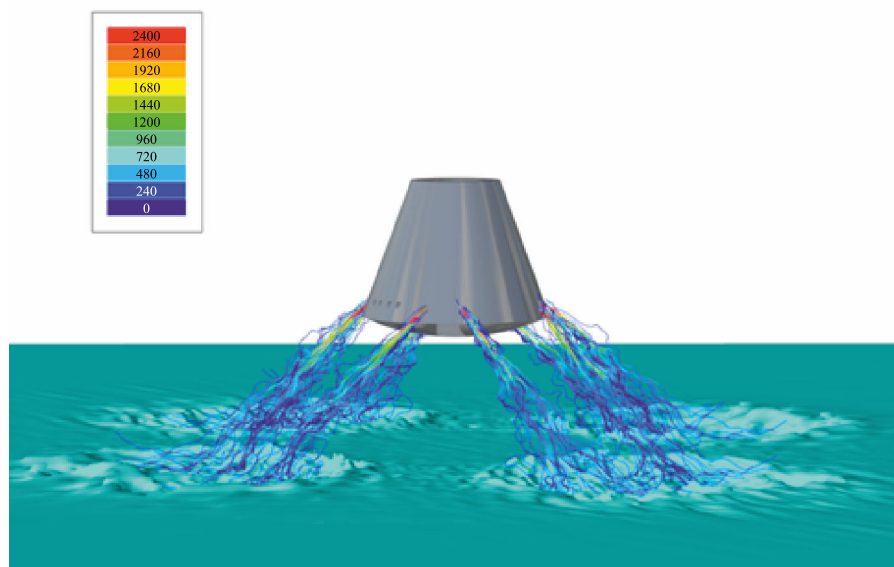


Рис. 1. Внешний вид возвращаемого аппарата. Визуализация ВА в процессе приводнения. Показаны форма водной поверхности и распределение скоростей в виде линий тока, м/с (цветная версия рисунка доступна в электронной версии на сайте журнала)

В штатном режиме ВА с помощью парашютно-реактивной системы совершает посадку на твердую поверхность (землю), но в нештатной ситуации допускается посадка на водную поверхность. В этом случае возникает необходимость исследования динамики поведения ВА и определения гидродинамических воздействий на конструкцию аппарата. Определение полей давления по поверхности корпуса ВА в различные моменты его погружения в водную среду позволяет сформировать исходные данные для прочностных расчетов, а структура течения воздуха и жидкости вблизи ВА дает понимание физических процессов взаимодействия аппарата с водой.

Вначале ВА движется на парашюте. В 10 метрах над поверхностью посадки (вода или грунт) парашюты отстреливаются и включаются сопловые установки, работающие до тех пор, пока ВА не коснется воды. Дополнительно моделируются случаи, когда сопловые установки не работают при снижении под углом в спокойную воду или на волнение. На рис. 2 показан внешний вид расчетной модели ВА с отделившимся лобовым теплозащитным экраном (ЛТЭ) и убранными в ниши защитного экрана посадочными устройствами.

## Численное моделирование

Задача приводнения ВА решается в двухфазной постановке (фаза воды и фаза воздуха), причем параметры течения в каждой фазе резко отличаются друг от друга по величине плотности и скорости распространения звука. Истечение продуктов сгорания из сопловых установок характеризуется высокими скоростями и давлениями, что усложняет задачу, по сравнению

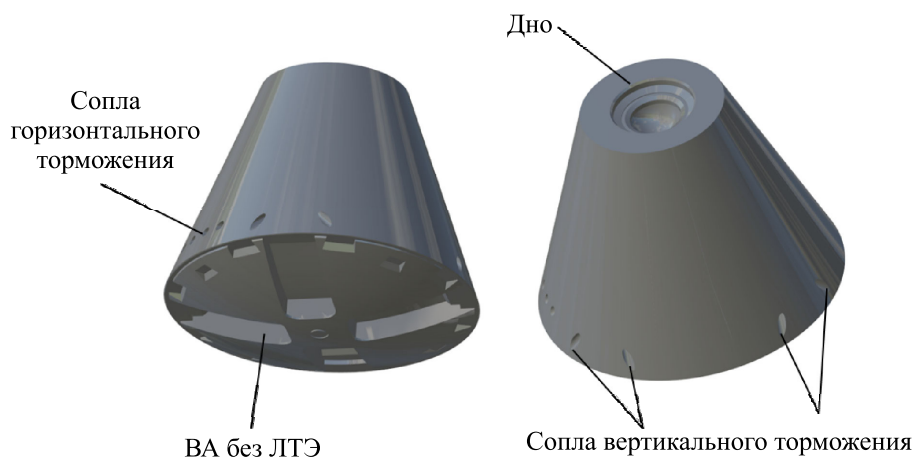


Рис. 2. Расчетная модель ВА

со свободным падением ВА в воду. В расчетах используется упрощение постановки задачи, в котором при взаимодействии горячих струй с водой кипение, испарение и образование водяного пара не учитываются. Газовые струи только нагревают и вытесняют воду.

Для моделирования переноса межфазных границ во FlowVision реализован метод VOF (Volume of fluid). Перенос границы фазы описывается уравнением для объемной доли этой фазы в расчетной ячейке, где объем фазы в ячейке принимает значение от 0 (газ) до 1 (жидкость). Таким образом, все ячейки для каждой фазы делятся на:

- газовые ( $f = 0$ ),
- поверхностные ( $0 < f < 1$ ),
- жидкостные ( $f = 1$ ),

где  $f$  — функция VOF.

Все поверхностные ячейки расщепляются на ячейки, каждая из которых содержит только свою фазу, расщепление производится одной плоскостью. После расщепления в каждую новую ячейку заносятся данные соответствующей фазы, уравнения для обеих фаз решаются совместно. В начале каждого шага по времени сетка восстанавливается к нерасщепленному виду, при этом данные из расщепленных ячеек заносятся в нерасщепленные.

Перенос контактной поверхности описывается конвективным уравнением:

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla f = 0. \quad (1)$$

Поверхностное натяжение на межфазной границе учитывается давлением Лапласа:

$$P_1 = P_2 + \sigma \cdot \operatorname{div}(n), \quad (2)$$

где  $P_1$  и  $P_2$  — относительное давление для первой и второй фаз,  $\sigma$  — коэффициент поверхностного натяжения,  $n$  — нормаль к межфазной границе.

Моделирование приводнения ВА занимает длительное время, что связано с особенностями явного расчета уровня границы раздела фаз (свободной поверхности). Для получения качественных результатов свободная поверхность должна моделироваться с большим количеством расчетных ячеек, но при этом за один шаг интегрирования перемещаться не более чем на одну ячейку. Сечение расчетной сетки для одного из вариантов показано на рис. 3.

Средний шаг интегрирования в задачах составляет  $2 \cdot 10^{-5}$  с, а весь процесс приводнения занимает около 5–6 с. Таким образом, для решения одной задачи нужно около 200 000 итераций. Для ускорения процесса получения решения использовался кластер.

Задача решалась в симметричной постановке, расчетная область и расстановка граничных условий представлены на рис. 4. Размер расчетной области составил  $20 \times 60 \times 30$  м.

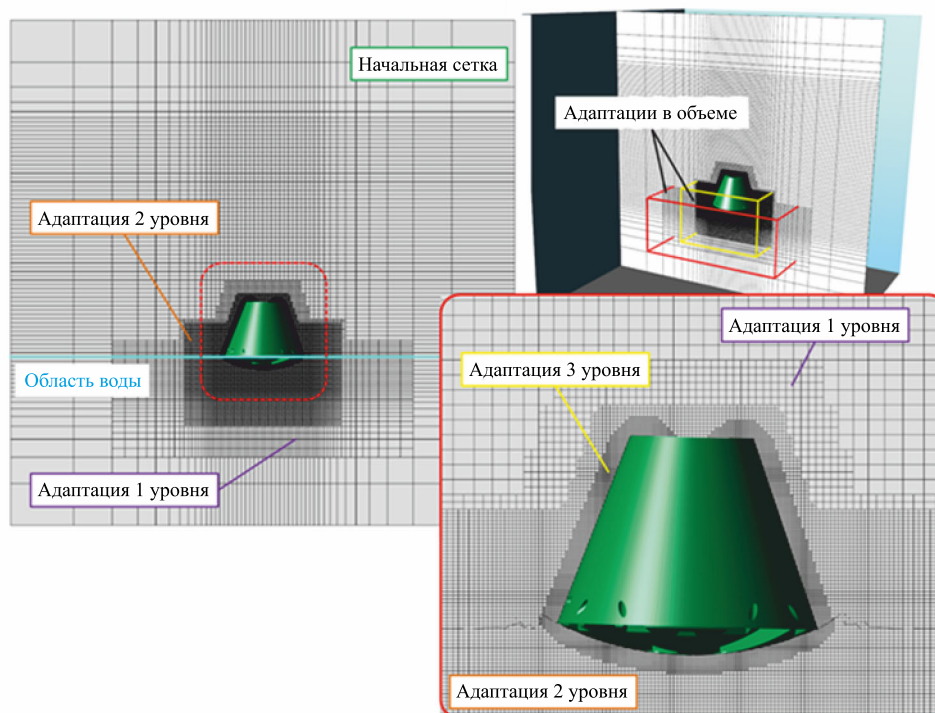


Рис. 3. Расчетная сетка для приведения ВА с неработающими сопловыми установками

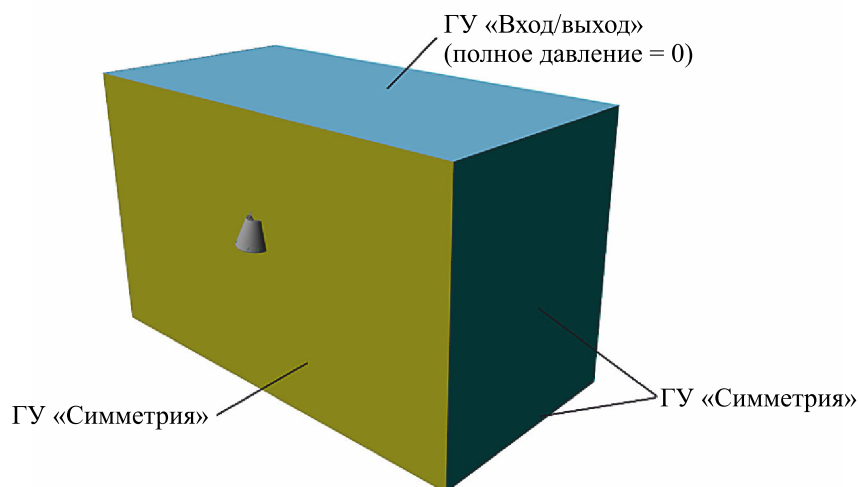


Рис. 4. Расчетная область и расстановка граничных условий

## Результаты моделирования

В результате моделирования были получены аэродинамические характеристики и нагрузки, действующие на ВА, а также динамическая картина поведения ВА.

Ниже приведены результаты для одного из рассмотренных вариантов посадки в нештатном режиме с неработающими соплами ПТДУ (с нулевым углом атаки). При свободном движении с высоты 10 м аппарат разгоняется и к моменту касания водной поверхности его скорость увеличивается до 16 м/с. При контакте с водой происходит резкое торможение ВА с последующим его погружением в водную среду (рис. 5).

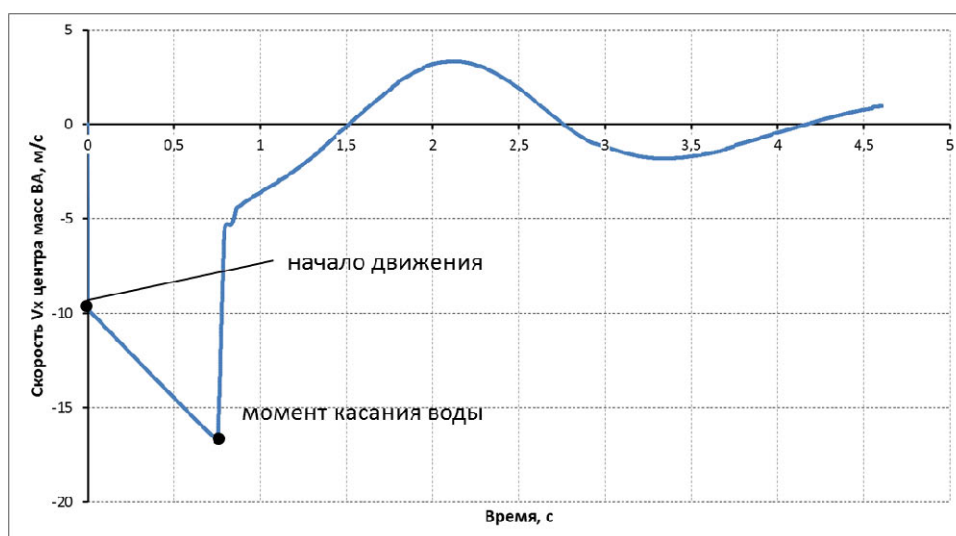


Рис. 5. Изменение вертикальной скорости центра масс ВА, м/с (сопловые установки отключены)

Максимальная глубина погружения центра масс аппарата достигает 1 м. Далее наблюдается несколько затухающих колебаний ВА на границе раздела сред (рис. 6).



Рис. 6. Изменение X-координаты центра масс ВА, м (сопловые установки отключены)

На рис. 7 представлена эпюра давления по образующим корпуса и ЛТЭ в продольном сечении ВА в момент касания воды.

Центр масс аппарата смещен от его продольной оси по нормальной координате, что приводит к увеличению угла тангажа  $\theta$  от  $0^\circ$  до  $\sim 3^\circ$ . В результате при входе в воду под ненулевым углом тангажа эпюры распределения давления на поверхности корпуса имеют асимметричный характер относительно плоскости симметрии аппарата. В результате удара о воду избыточное (по сравнению с атмосферным) давление на гладкой поверхности защитного экрана за малый промежуток времени ( $\Delta t \sim 0.02$  с) возрастает от 0 до  $\sim 570\,000$  Па.

На рис. 8 показано распределение давления по ЛТЭ в момент касания воды.

В момент касания водной поверхности осредненное по смоченной поверхности избыточное давление составляет  $\sim 800\,000$  Па. В последующие моменты времени давление резко уменьшается по величине и меняет знак. Локальное максимальное давление в критической точке в момент касания воды достигает значений  $19\,000\,000$  Па.



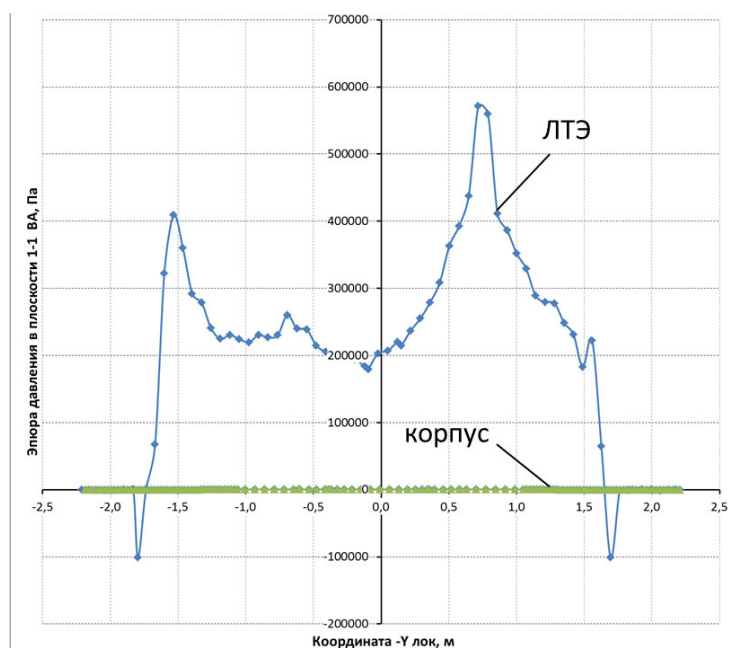


Рис. 7. Эпюра давления в продольном сечении ВА в момент касания воды, Па

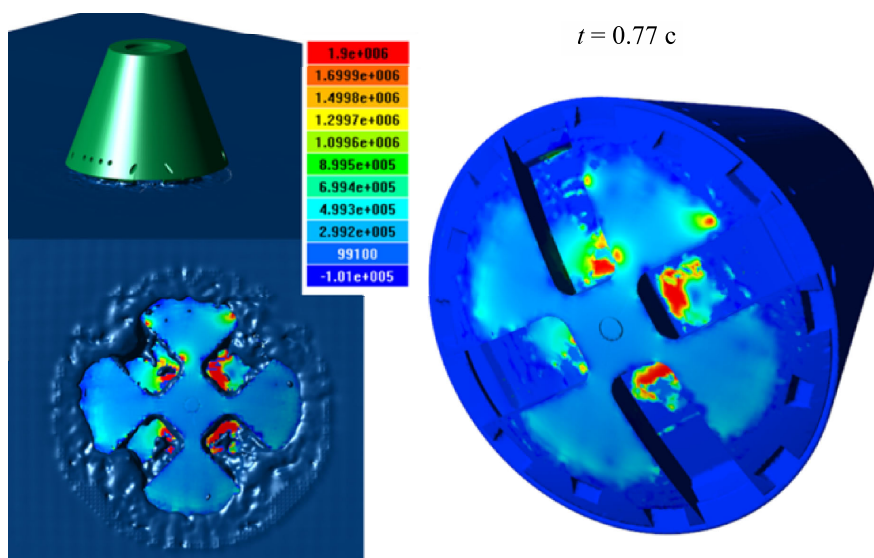


Рис. 8. Распределение давления по экрану ВА в момент касания воды, Па (цветная версия рисунка доступна в электронной версии на сайте журнала)

На рис. 9 показана эпюра давления в поперечном сечении ВА в момент максимального погружения в воду. Видно, что давление на поверхности защитного экрана уменьшается и величина разрежения на эпюре достигает значений  $-14\,500$  Па.

Ниже рассмотрены результаты, полученные для варианта посадки на гладкую водную поверхность с углом атаки  $15^\circ$  и угловой скоростью  $30$  град/с.

ВА начинает движение с начальной скоростью  $8$  м/с, в момент касания воды ( $t = 0.259$  с) сопла отключаются, скорость ВА составляет  $1.053$  м/с. Далее ВА совершает падение в каверну, образованную газовыми струями, и снова выталкивается водой вверх (рис. 10).

В местах взаимодействия струй с водой образуются каверны. Волны поднимаются навстречу ВА на высоту до  $2.3$  м. После отключения сопел аппарат продолжает крениться на бок и падает в вырытую каверну. Далее вода выталкивает ВА вверх (рис. 11).

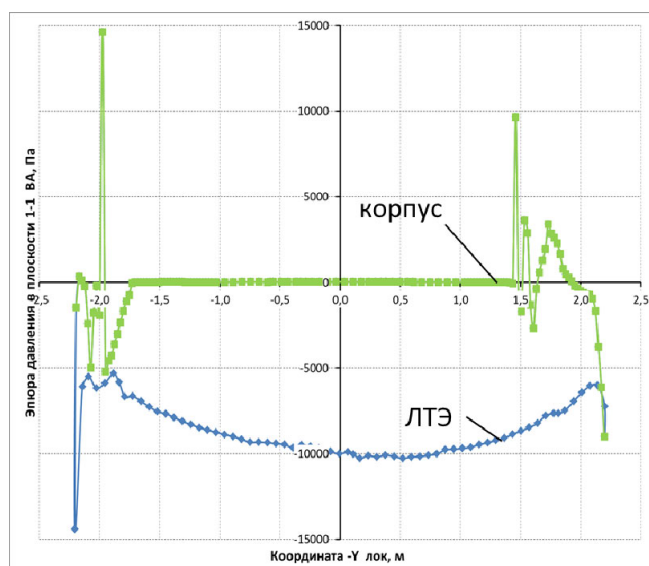


Рис. 9. Распределение давления по экрану ВА в момент максимального погружения ВА

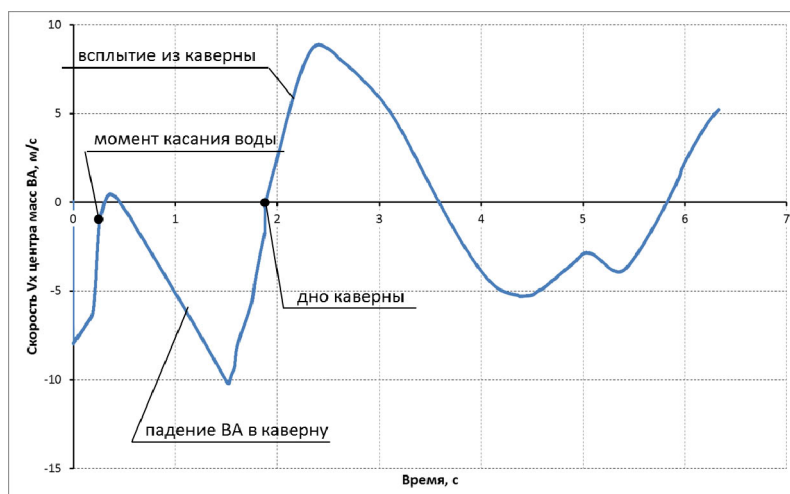


Рис. 10. Изменение вертикальной скорости центра масс ВА (ПТДУ включены), м/с



Рис. 11. Изменение X-координаты центра масс ВА (ПТДУ включены), м



Положение ВА в момент отключения сопел, а также эпюра давления в продольном сечении ВА и распределение давления по ЛТЭ показаны на рис. 12.

Максимальные значения давления в локальных точках достигают значений около 700 000 Па, средние значения составляют порядка 250 000 Па.

В момент максимального погружения ВА растет величина разрежения на экране, минимальные значения избыточного давления составляют –34 900 Па (рис. 13).

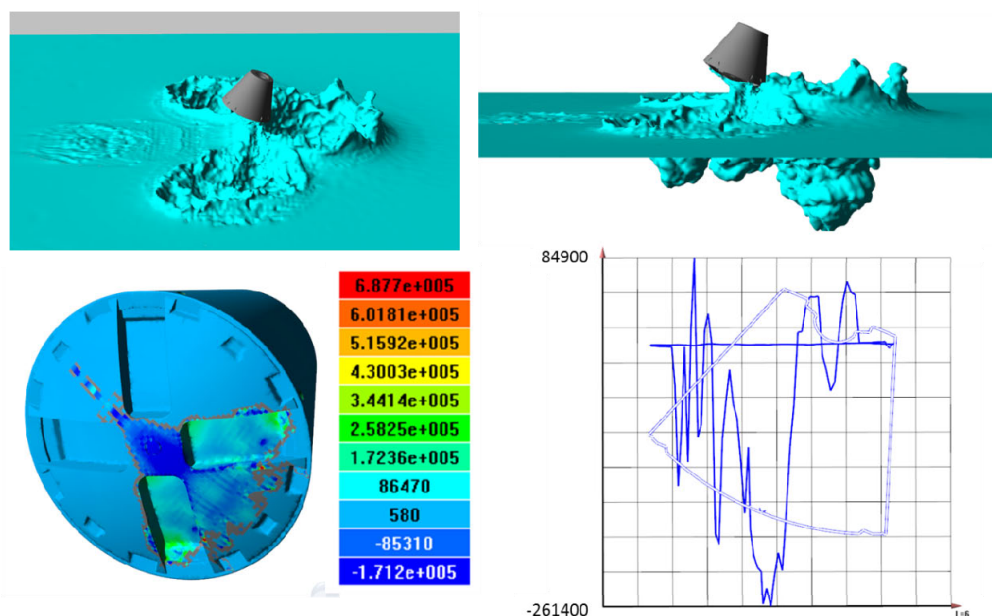


Рис. 12. Положение ВА, распределение давления по ЛТЭ и эпюра в поперечном сечении ВА в момент отключения сопел (ПТДУ включены), Па (цветная версия рисунка доступна в электронной версии на сайте журнала)

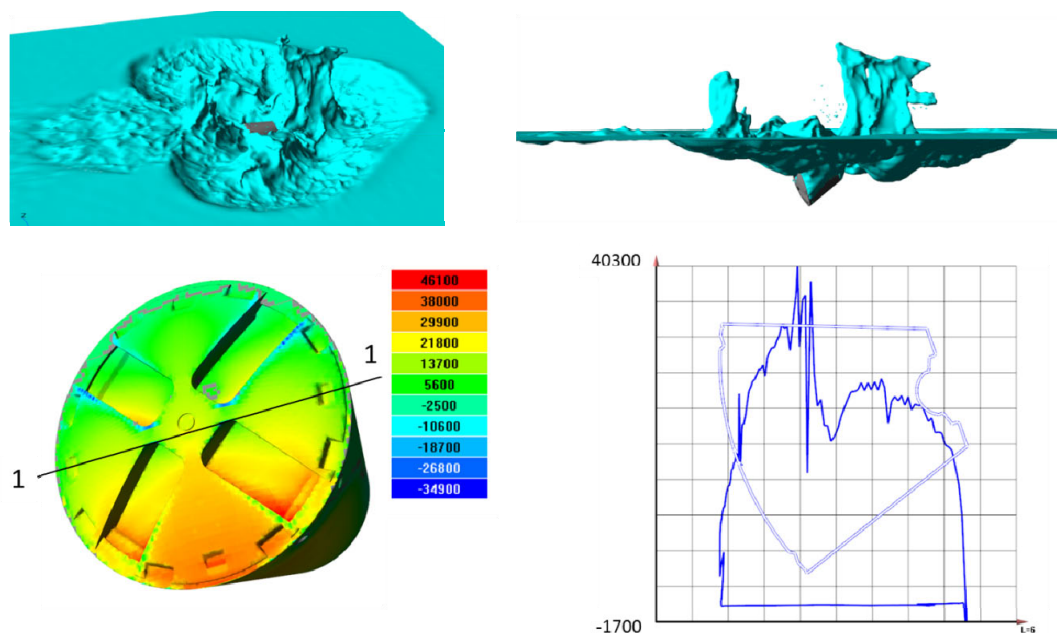


Рис. 13. Положение ВА, распределение давления по ЛТЭ и эпюра в поперечном сечении ВА в момент максимального погружения (ПТДУ включены), Па (цветная версия рисунка доступна в электронной версии на сайте журнала)

## Заключение

В результате моделирования были выявлены основные особенности динамики взаимодействия аппарата с водной средой. Определены гидродинамические силы и моменты, действующие на ВА при приводнении и в процессе движения в водной среде. Проведенные исследования показали, что случай приводнения аппарата, в силу больших гидродинамических воздействий и продольных перегрузок, следует рассматривать как один из основных расчетных случаев при анализе нагружения и прочности конструкции корпуса, в особенности это относится к защитному экрану и отсекам приборного оборудования ВА. Для выявления предельных значений воздействий на аппарат необходимо проведение дальнейших расчетных исследований с учетом реальных жесткостных характеристик защитного экрана и лобового теплозащитного экрана в случае несрабатывания средств его отделения. Численные результаты требуют валидации с экспериментальными моделями.

## Список литературы (References)

- Аксенов А. А., Дядькин А. А., Харченко С. А.* Исследование эффективности распараллеливания расчета движения подвижных тел и свободных поверхностей во FlowVision на компьютерах с распределенной памятью // Вычислительные методы и программирование. — 2009. — Т. 10, № 1. — С. 44.
- Aksenov A. A., Dyadkin A. A., Harchenko S. A.* Issledovanie effektivnosti rasparallelivaniya rascheta dvigeniya podvighnih tel i svobodnyh poverhnostey vo FlowVision na kompyuterah s raspredelennoy pamyatyu [Investigation of parallelization efficiency of calculation of moving bodies and contact surfaces in FlowVision software on computers with distributed memory] // Vychislitelnie metody i programirovanie [Computational methods and programming]. — 2009. — Vol. 10, no.1. — P. 44 (in Russian).
- Антонова Н. П., Брюханов Н. А., Четкин С. В.* Средства посадки пилотируемого транспортного корабля нового поколения // Космическая техника и технологии. — 2014. — Т. 4, № 7. — С. 21–30.
- Antonova N. P., Bryuchanov N. A., Chetkin S. V.* Sredstva posadki pilotiruemogo transportnogo korablya novogo pokoleniya [Landing means for manned transport space vehicle of new generation] // Kosmicheskaya tekhnika iologii [Space equipment and technologies]. — 2014. — Vol. 4, no. 7. — P. 21–30 (in Russian).
- Aksenov A., Dyadkin A., Pokhilko V.* Overcoming of Barrier between CAD and CFD by Modified Finite Volume Method // Proc. 1998 ASME Pressure Vessels and Piping Division Conference, San Diego. — ASME PVP. — 1998. — Vol. 377, no. 2. — P. 79–86.
- FlowVision. Руководство пользователя. — М.: ООО «ТЕСИС», 2016.
- FlowVision. User's guide. — Moscow: Ltd. "TESIS", 2016 (in Russian).