

УДК: 629.584

## Применение технологий численного моделирования при проектировании систем отделения самовыходом

А. О. Пыреев<sup>a</sup>, Ю. А. Тарасов<sup>b</sup>

Акционерное общество «Центральное конструкторское бюро морской техники “Рубин”»  
Россия, 191119, г. Санкт-Петербург, ул. Марата, д. 90  
E-mail: <sup>a</sup> neptun@ckb-rubin.ru, <sup>b</sup> frixus007@gmail.com

*Получено 10.07.2019, после доработки — 27.12.2019.  
Принято к публикации 25.02.2020.*

В статье изложены основные положения методики расчета отделения полезной нагрузки (объектов различного назначения с собственным движительным комплексом) от подводного носителя методом самовыхода с использованием современных методов численной гидродинамики (CFD-технологий). Приводится описание метода отделения самовыходом, его достоинства и недостатки. Приводятся результаты исследования сходимости по сетке конечно-объемной модели по критерию «точность–время», а также результаты сопоставления расчета с экспериментом (валидации модели). Валидация модели проводилась по имеющимся данным экспериментального определения тяговых характеристик водометного движительного комплекса натурального образца в опытовом бассейне. Расчеты тяговых характеристик водометного движительного комплекса проводились с применением программного комплекса FlowVision версии 3.10. На основании сопоставления результатов расчетов для условий проведения экспериментов была определена погрешность расчетной модели водометного движительного комплекса, которая составила не более 5 % в диапазоне поступей работы водометного движительного комплекса, реализуемых в процессе отделения методом самовыхода. Полученное значение погрешности расчета тяговых характеристик используется для определения предельных расчетных значений скорости отделения объекта от носителя (минимальные и максимальные значения). Рассмотренная задача является значимой с научной точки зрения благодаря особенностям подхода к моделированию водометного движительного комплекса совместно с движением отделяемого объекта, а также с практической точки зрения благодаря возможности получения с высокой степенью достоверности параметров отделения объектов от подводных аппаратов методом самовыхода, условия работы которых предполагают движение в замкнутых объемах, уже на стадии проектирования.

Ключевые слова: CFD-технологии, водометный движитель, моделирование вращения, тяга движительного комплекса, самовыход, самоходные испытания, исследования сходимости по сетке, швартовый режим

UDC: 629.584

## Application of computational simulation techniques for designing swim-out release systems

A. O. Pyreev<sup>a</sup>, Yu. A. Tarasov<sup>b</sup>

JSC “CDB ME “Rubin”,  
90 Marata st., St. Petersburg, 191119, Russia

E-mail: <sup>a</sup>neptun@ckb-rubin.ru, <sup>b</sup>frixus007@gmail.com

*Received 10.07.2019, after completion — 27.12.2019.  
Accepted for publication 25.02.2020.*

The article describes the basic approaches of the calculation procedure of payload swim-out (objects of different function with own propulsor) from the underwater carrier a method of a self-exit using modern CFD technologies. It contains the description of swim-out by a self-exit method, its advantages and disadvantages. Also it contains results of research of convergence on a grid of a final-volume model with accuracy-time criterion, and results of comparison of calculation with experiment (validation of models). Validation of models was carried out using the available data of experimental definition of traction characteristics of water-jet propulsor of the natural sample in the development pool. Calculations of traction characteristics of water-jet propulsor were carried out via software package FlowVision ver. 3.10. On the basis of comparison of results of calculations for conditions of carrying out of experiments the error of water-jet propulsor calculated model which has made no more than 5% in a range of advance coefficient water-jet propulsor, realised in the process of swim-out by a self-exit method has been defined. The received value of an error of calculation of traction characteristics is used for definition of limiting settlement values of speed of branch of object from the carrier (the minimum and maximum values). The considered problem is significant from the scientific point of view thanks to features of the approach to modelling hydrojet moving system together with movement of separated object, and also from the practical point of view, thanks to possibility of reception with high degree of reliability of parameters swim-out of objects from sea bed vehicles a method of the self-exit which working conditions are assumed by movement in the closed volumes, already on a design stage.

Keywords: CFD technologies, water-jet propulsor, simulation of rotation, thrust of propulsion system, swim-out, self-propulsion test, mesh convergence research, mooring mode

Citation: *Computer Research and Modeling*, 2020, vol. 12, no. 3, pp. 597–606 (Russian).

## 1. Введение

Мировой океан является самой неисследованной частью нашей планеты. Бурное развитие роботостроения, в том числе и развитие необитаемых подводных аппаратов (НПА), позволяет ожидать серьезных научных открытий в части освоения мирового океана. Перед инженерами мирового сообщества возникают сложные вопросы проектирования НПА, решение которых обеспечит научные открытия.

Неотъемлемой задачей, решаемой при проектировании НПА, является обеспечение доставки их к месту выполнения работ. Одним из способов решения данной задачи является создание носителей — тяжелых подводных аппаратов, которые несут на своем борту группу НПА. По прибытии к месту проведения работ группа НПА отделяется от носителя.

НПА могут размещаться в замкнутых объемах носителя, при этом перед проектировщиками ставится сложная инженерная задача безаварийного отделения.

Моделирование процессов отделения очень важный этап проектирования, позволяющий минимизировать конструктивные ошибки до начала экспериментальной отработки систем. Также экспериментальную отработку систем невозможно провести для всего диапазона эксплуатационных условий, и только математическое моделирование позволяет провести более глубокий анализ работы систем. При этом моделирование процесса отделения является сложной инженерной задачей, актуальной не только для предприятий-разработчиков НПА, но и для науки в целом.

Современный уровень развития технологий численного моделирования механики жидкости и газа (CFD — Computational Fluid Dynamics) позволяет пересмотреть подходы к моделированию работы подводной техники. Внедрение технологий CFD идет по принципу от частного к общему, то есть трехмерные расчетные модели становятся более подробными с точки зрения описываемых конструкций, а также происходит одновременное моделирование нескольких физических процессов, к примеру внешнее обтекание подводных объектов совместно с работой движительного комплекса.

Моделированию процессов отделения НПА от носителя с использованием современных CFD-технологий посвящен ряд научных работ [Zhang et al., 2009; Pécot, Taillefet, 2019], что подтверждает научный интерес к данной проблеме.

В данной статье описана методика, разработанная в АО «ЦКБ МТ «Рубин», позволяющая провести моделирование отделения подводного аппарата от носителя, размещенного в проницаемом контейнере, за счет собственного движительного комплекса — методом самовыхода с использованием российского программного комплекса (ПК) FlowVision. ПК FlowVision успешно применяется для решения гидродинамических задач [Король, Рудько; Аксенов и др., 2009].

Особенностью данной методики является проведение валидации результатов моделирования работы движительного комплекса по экспериментальным работам.

## 2. Постановка задачи

Метод самовыхода является старейшим способом отделения объектов от носителя, поскольку не требует размещения дополнительных устройств, обеспечивающих отделение. И тем не менее актуальность самовыхода остается высокой в наше время благодаря тому, что данный способ является наиболее бесшумным. Тем не менее данный метод отделения обладает рядом ограничений, сильно затрудняющих его реализацию:

- необходимость наличия собственного движителя у отделяемого объекта;
- зависимость длины пусковой установки от мощности движителя; на момент схода с направляющих отделяемый объект должен обладать достаточной для управления скоростью движением;
- работа движительного комплекса может существенно отличаться в условиях пусковой установки. При этом должна быть обеспечена достаточная проницаемость пусковой установки для сохранения работоспособности движительного комплекса.

Описанные выше ограничения не позволили до настоящего времени создать единую расчетную методику, позволяющую определять параметры отделения (зависимости скорости и ускорения от времени) при реализации метода самовыхода. В литературе описано лишь общее требование проектирования пусковых установок круглого сечения: внутренний диаметр пусковой установки должен в 1.4 раза превышать внешний диаметр отделяемого объекта для обеспечения беспрепятственного перетекания воды в заднюю часть пусковой установки для замещения освобождаемого объема и минимизации поршневой силы [Borisenko et al., 2002]. Все это приводит к тому, что проектировщики морской техники отказываются от самовыхода, поскольку уже на этапах технического проекта необходимо теоретически подтверждать обеспечение допустимых параметров (скорость, ускорение) отделения объектов от носителя.

При проектировании подводной техники важнейшими факторами являются обеспечение запаса плавучести, сохранение внешних обводов, соответствующих теоретическому чертежу, по которому определяются гидродинамические параметры носителя, а соответственно, его предельные скорости, маневренность и т. д., а также обеспечение прочности. Поэтому формирование облика пусковых установок является сложнейшей задачей, и при отсутствии типовых норм проектирования исполнение конкретной пусковой установки может быть самым разнообразным, как например:

- непроницаемые оболочки различного поперечного сечения с закрытым задним торцом,
- непроницаемые оболочки различного поперечного сечения с открытым задним торцом,
- перфорированные оболочки различного поперечного сечения.

В данной статье рассмотрен вариант пусковой установки, представляющий из себя перфорированную оболочку прямоугольного сечения. Данная пусковая установка приведена на рис. 1. В пусковой установке размещается отделяемый объект, приведенный на рис. 2. На рис. 3 приведено размещение отделяемого объекта в пусковой установке.

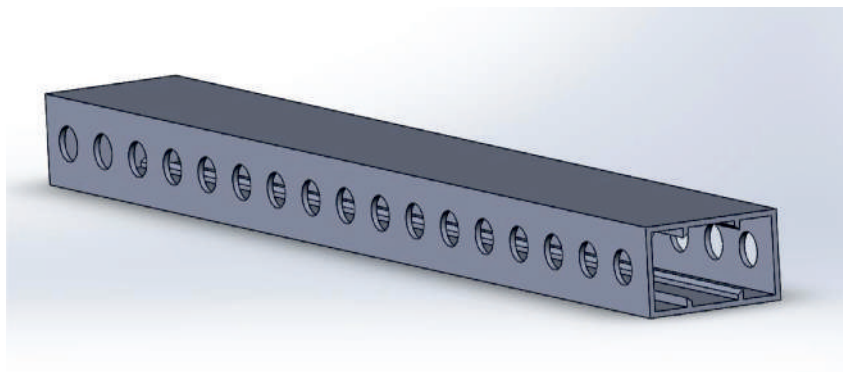


Рис. 1. Пусковая установка

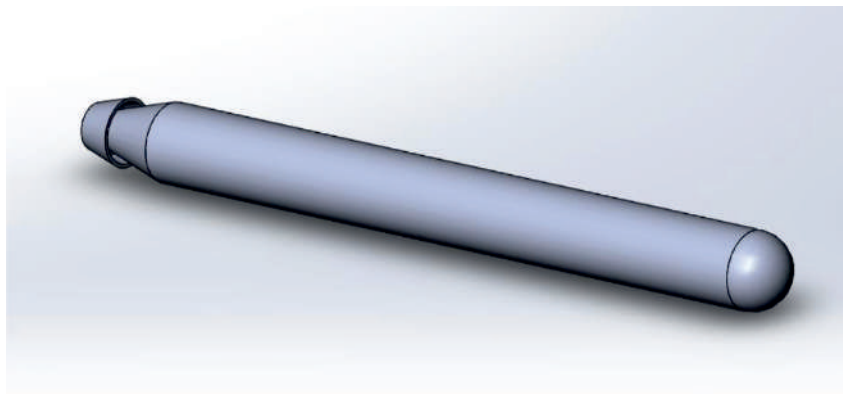


Рис. 2. Отделяемый объект

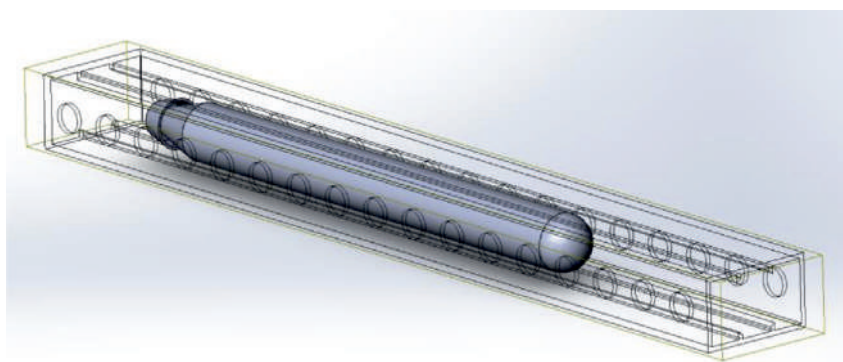


Рис. 3. Отделяемый объект в пусковой установке

Для моделирования процесса отделения изделия из пусковой установки была разработана конечно-объемная модель в пакете программ FlowVision. Особенностью постановки задачи является прямое моделирование вращения ротора двигателя с заданным числом оборотов. Такой подход позволяет исключить искусственное разделение гидродинамической силы, действующей на отделяемый объект, на составляющие: тяги, сопротивления, поршневой силы, а также влияния кормовой части отделяемого объекта на тягу двигателя. На самом деле разделение гидродинамической силы на составляющие искусственно и, при некорректной стыковке результатов расчета составляющих сил, а также неучета взаимовлияния составляющих сил друг на друга, может привести к искажению решения суммарной задачи. Выявление же таких ошибок, как правило, происходит на стадии испытаний, что существенно увеличивает время и сроки создания техники.

Общий вид конечно-объемной модели приведен на рис. 4.

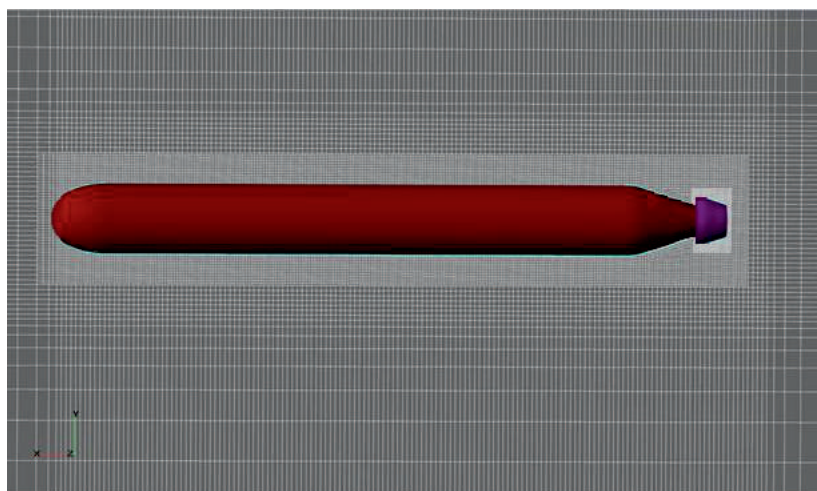


Рис. 4. Общий вид конечно-объемной модели

В поставленной задаче для определения гидродинамических сил и моментов, возникающих при обтекании тел решается система уравнений Навье–Стокса, включающая в себя уравнение неразрывности и уравнение импульсов. Ниже приведен вид системы уравнений Навье–Стокса, решаемой в программном комплексе FlowVision [Руководство пользователя FlowVision].

$$\begin{cases} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho V) = 0, \\ \frac{\partial \rho V}{\partial t} + \nabla(\rho V \otimes V) = -\nabla P + \nabla \cdot \hat{\tau}_{\text{eff}} + DV - \hat{D}V + F + F_{\text{el}} + F_{\text{user}}, \end{cases}$$

где  $\rho$  — плотность среды,  $t$  — время,  $\nabla$  — оператор Набла,  $V$  — скорость среды (вектор),  $P$  — давление,  $\hat{\tau}_{\text{eff}}$  — тензор вязких напряжений,  $D$  — коэффициент изотропного сопротивления,  $\hat{D}$  — матрица анизотропного сопротивления,  $F$  — сила тяжести,  $F_{\text{el}}$  — сила, действующая со стороны электростатического поля на единичный объем среды,  $F_{\text{user}}$  — дополнительная объемная сила.

Для конечно-объемной модели задаются следующие граничные условия:

- скорость потока, соответствующая скорости носителя на входе в расчетную область;
- нулевое давление — на выходе и внешних границах расчетной области.

Используется модель турбулентности  $k$ - $\epsilon$  «Стандартная».

Взаимодействие между ротором движителя и отделяемым объектом организовано следующим образом:

- для ротора задается закон частоты вращения от времени (для имитации выхода на режим);
- интегральная гидродинамическая сила, получаемая на поверхности ротора, передается в качестве внешней силы, воздействующей на отделяемый объект, на каждом расчетном шаге;
- под действием переданной силы происходит расчет параметров движения объекта;
- полученная скорость объекта на каждом шаге передается ротору движителя, тем самым ротор находится в связке с отделяемым объектом.

Сложность решения задач гидродинамики с применением современных технологий численного моделирования механики жидкости и газа заключается в необходимости валидации результатов, то есть сопоставлении результатов расчетов с данными экспериментальных работ. Валидация процесса самовыхода крайне затруднительна, поскольку требует создания специальных стендов и измерительной аппаратуры. При этом на момент разработки модели были получены экспериментальные данные по замерам тягового усилия отделяемого объекта при различных оборотах ротора. Поэтому для валидации разработанной модели был предложен следующий алгоритм.

1. Разработанная модель упрощается в части исключения носителя и пусковой установки.

2. Проводится серия расчетов для условий экспериментальных замеров с целью получения тяговых характеристик при различных поступях. При этом просчитываются варианты с различной начальной сеткой и степенью адаптации.

3. Определяется отклонение полученных значений тяги расчетным способом и экспериментальным.

4. На основании полученных отклонений между расчетными характеристиками и экспериментальными определяются требуемая расчетная сетка и погрешность расчета параметров самовыхода.

Тяга движителя определяется по следующей формуле:

$$T = F_{\text{сумм}} - F,$$

где  $T$  — тяга,  $F_{\text{сумм}}$  — суммарная гидродинамическая сила, определяемая как интегральная характеристика по всей поверхности отделяемого объекта,  $F$  — гидродинамическая сила (сила сопротивления), полученная при неработающем движителе.

Для определения силы тяги требуется определение гидродинамического сопротивления при неработающем движителе. В экспериментах скорость буксировки объекта составляла 6.0 м/с. Экспериментальное значение гидродинамического сопротивления составило 116 Н.

Для данных условий были проведены расчеты гидродинамического сопротивления с использованием программного комплекса FlowVision. Расчеты с использованием программного комплекса FlowVision были проведены для четырех типов начальных сеток со степенью адаптации до 3 уровня. Результаты расчета гидродинамического сопротивления приведены в таблице 1. Расчеты проводились с использованием технологии параллельных вычислений, было задействовано 96 вычислительных ядер.

Таблица 1. Результаты расчета

№	Размер начальной сетки, м	Уровень адаптации	Характерный размер пристеночной ячейки, м	Количество элементов, млн	Сила сопротивления, Н	Сопротивление формы, Н	Сопротивление трения, Н
1	0.040	3	0.00500	0.8	138	50	88
2	0.020	3	0.00250	2.6	125	37	88
3	0.010	3	0.00125	8.7	114	27	87
4	0.008	3	0.00100	13.3	113	25	88

Как видно из таблицы 1, расчетное значение гидродинамического сопротивления при минимальном значении характерного размера пристеночной ячейки меньше экспериментального на 2.5 %. Это можно объяснить как погрешностью проведения эксперимента (замера силы сопротивления, скорости потока), так и отличием реального макетного образца от идеализированного расчетного.

Следует отметить, что применение технологий численного моделирования механики жидкости и газа требует существенных затрат на проведение вычислений, а с учетом необходимости решения задачи для ряда внешних граничных условий суммарное время решения инженерной задачи может превышать имеющиеся временные ресурсы. Поэтому для проведения дальнейших исследований была взята за основу сетка с начальным размером ячейки 0.02 м, при этом точность расчета по сравнению с экспериментом составит 7.8 %, что приемлемо для инженерных задач.

### 3. Результаты расчетов

Были проведены расчеты, соответствующие швартовному режиму, при котором отсутствует движение объекта, а ротор движителя вращается на максимальных оборотах. На рис. 5 приведены результаты расчета тяги движителя и момента на валу, а также экспериментальные значения.

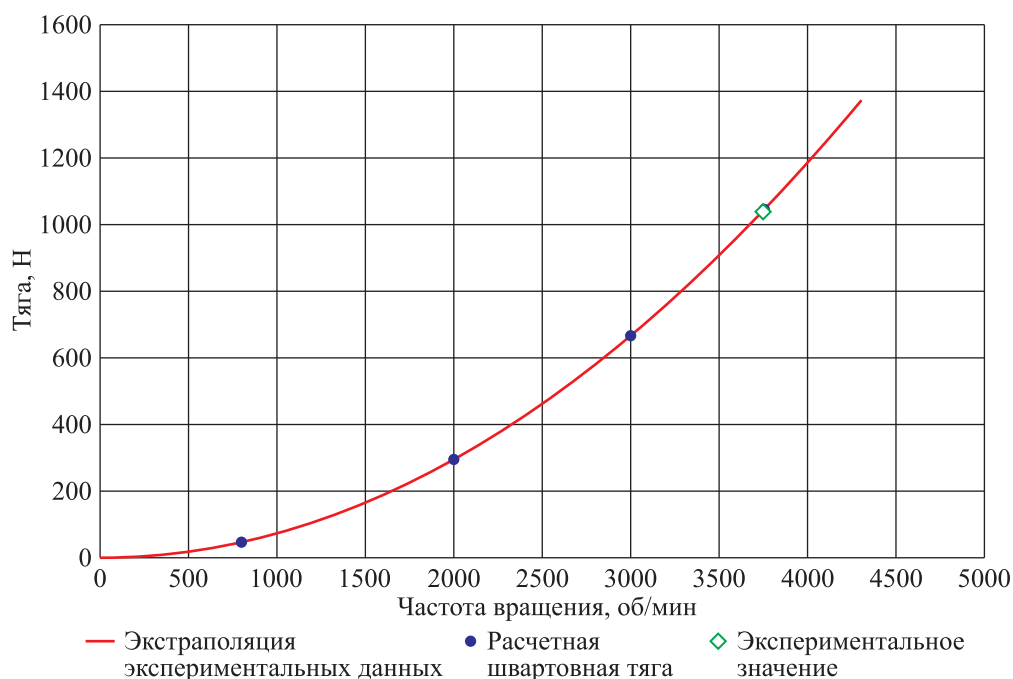


Рис. 5. Швартовная тяга



Как видно из рис. 5, имеет место хорошее совпадение экспериментальных и расчетных значений швартовной тяги. Численно экспериментальное значение швартовной тяги на оборотах ротора двигателя 3750 об/мин составляет 1040 Н, расчетное — 1047 Н. Экспериментальное значение момента на валу составляет 45.1 Н·м, расчетное — 37.5 Н·м.

Далее была проведена серия расчетов с имитацией самоходных испытаний, при которых производилась буксировка объекта со скоростью 6.0 м/с, частота вращения ротора двигателя варьировалась в диапазоне от 844 об/мин до 1738 об/мин.

Результаты расчетов тяговых характеристик, полученных при валидации модели по самоходным испытаниям, приведены на рис. 6, 7. На рис. 6, 7 приведено сопоставление экспериментального и расчетного значений коэффициентов тяги и момента в зависимости от относительной поступи.

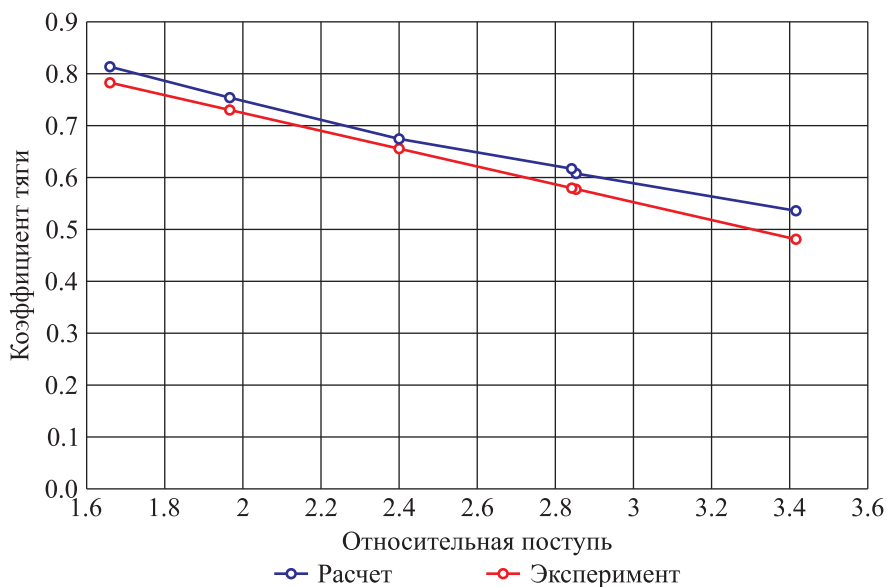


Рис. 6. Зависимость расчетного и экспериментального значений коэффициента тяги от относительной поступи

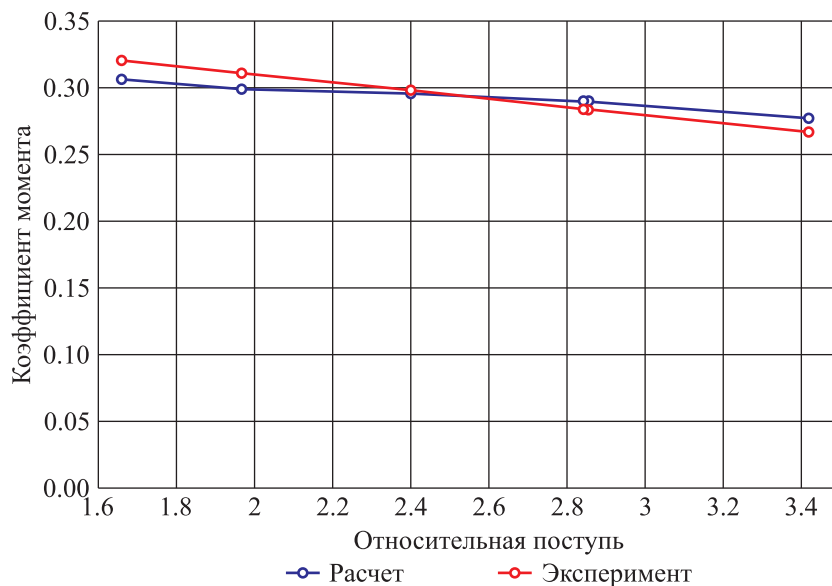


Рис. 7. Зависимость расчетного и экспериментального значений коэффициента тяги от относительной поступи



Зависимость погрешности расчета от относительной поступи, полученная при валидации модели, приведена на рис. 8. Данная погрешность может быть использована при проведении расчета самовыхода. На основе расчетных зависимостей скорости от времени будут построены предельные зависимости с учетом полученной при валидации погрешности.

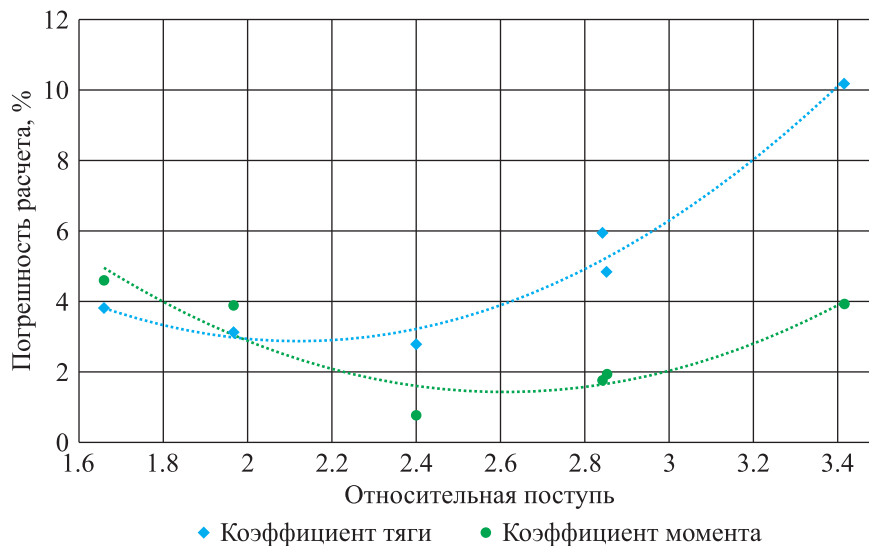


Рис. 8. Погрешность расчета коэффициентов тяги и момента

Как видно из рис. 8, максимальная погрешность валидационного расчета составила 10 % по коэффициенту тяги при относительной поступи, равной 3.4. При этом было определено значение возможных относительных поступей, реализуемых при самовыходе. Максимальная поступь составит не более 2.5. Таким образом, при расчете самовыхода погрешность составит не более 5 %.

Полученное значение погрешности расчета тяговых характеристик используется для определения предельных расчетных значений скорости отделения объекта от носителя. На рис. 9 приведены номинальная расчетная зависимость скорости движения объекта от времени и предельные значения.

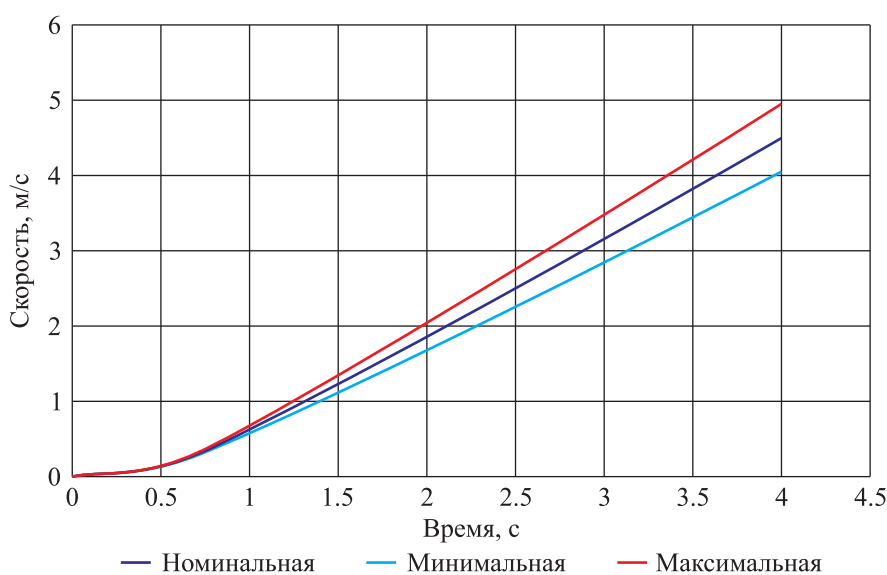


Рис. 9. Зависимость скорости движения и предельные значения

## 4. Заключение

В ходе проведения работ была получена рабочая методика расчета отделения НПА от носителей методом самовыхода при размещении НПА в проницаемой пусковой установке. Результатом расчета являются предельные значения скорости движения объекта при отделении, полученные с использованием погрешностей валидационного расчета. Скорости отделения НПА очень важны с точки зрения:

- проверки безаварийности отделения,
- расхождения НПА с носителем,
- управляемости НПА после отделения,
- прочности конструкции НПА.

Внедрение данной методики расчета отделения НПА от носителей позволило отказаться от привлечения сторонних организаций к проектированию пусковой установки и сэкономить временные и финансовые ресурсы.

Решение задачи отделения НПА от носителя на ранних этапах проектирования носителя позволило:

- подтвердить принципиальную возможность применения самовыхода для отделения НПА от носителя;
- предложить ряд конструктивных доработок пусковой установки, позволяющих улучшить параметры отделения НПА;
- определить воздействие на носитель при отделении и учесть его влияние при проектировании системы управления носителем;
- подтвердить ряд требований технического задания на носитель для условий эксплуатации, которые не могут быть проверены в условиях экспериментальной отработки.

С учетом положительных результатов, полученных после внедрения данной методики расчета отделения НПА в процесс проектирования, она может быть использована при проектировании пусковых установок любого конструктивного исполнения, методом отделения которых является самовыход.

## Список литературы (References)

*Аксёнов 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.

*Aksyonov A. A., Dyad'kin A. A., Harchenko S. A.* Issledovanie effektivnosti rasparallelivaniya raschyota dvizheniya podvizhnyh tel i svobodnyh poverhnostej vo FlowVision na komp'yuterah s raspredelennoj pamyat'yu [A study on efficiency of algorithms for calculating the flows bounded by moving solids and free surfaces implemented in FlowVision on distributed memory computers] // Numerical methods and programming. — 2009. — Vol. 10, No. 10 (in Russian).

*Борисенко К. П., Ефимов О. И., Красильников Е. П.* Торпедные аппараты подводных лодок: учеб. пособие. — СПб.: Изд. центр СПбГМТУ, 2002. — 75 с.

*Borisenko K. P., Efimov O. I., Krasil'nikov E. P.* Torpednie apparati podvodnix lodok. Ucheb. posobie [Torpedo tubes of submarines]. — St. Petersburg: Izd centr SPbGMTU, 2002. — 75 p. (in Russian).

*Король Ю. М., Рудько О. Н.* Технология моделирования работы судовых винторулевых комплексов в среде FlowVision [Электронный ресурс]. — URL: [https://flowvision.ru/images/2016/fv\\_es10\\_nukua1.pdf](https://flowvision.ru/images/2016/fv_es10_nukua1.pdf) (дата обращения: 01.05.2019).

*Korol' Yu. M., Rud'ko O. N.* Tekhnologiya modelirovaniya raboty sudovyh vinto-rulevyh kompleksov v srede FlowVision [Technology for modeling the operation of ship's screw-steering systems in the FlowVision environment] [Electronic resource]. — URL: [https://flowvision.ru/images/2016/fv\\_es10\\_nukua1.pdf](https://flowvision.ru/images/2016/fv_es10_nukua1.pdf) (accessed: 01.05.2019) (in Russian).

*Pécot F., Taillefet T.* CFD simulation of a torpedo swim-out launching // UDT. — 2019.

*Zhang X., Wang S., Yu D.* 2D Axisymmetric CFD Simulation of Underwater Torpedo Launch Tube Flow // IEEE. — 2009.