

*В.Г. Дегтярь, В.И. Пегов*



# ГИДРОДИНАМИКА ПОДВОДНОГО СТАРТА РАКЕТ

Машиностроение

В.Г. Дегтярь, В.И. Пегов

# ГИДРОДИНАМИКА ПОДВОДНОГО СТАРТА РАКЕТ

Москва “Машиностроение” 2009  
“Машиностроение-Полет”

УДК 629.762.2.085.5  
ББК 68.8  
Д26

**Дегтярь В.Г., Пегов В.И.**

Д26 Гидродинамика подводного старта ракет. — М.: Машиностроение / Машиностроение-Полет, 2009. — 448 с.: ил.

ISBN 978-5-217-03443-7

Рассмотрены общая постановка задачи гидродинамики морских баллистических ракет, вывод системы дифференциальных уравнений и кинематических соотношений, необходимых для описания пространственного движения ракет внутри взволнованной жидкости. Получены общие выражения для действующих на ракету гидродинамических сил и моментов через коэффициенты присоединенных масс ракеты и производные по времени от этих коэффициентов. Приведены разработанные приближенные и численные методы расчета гидродинамических характеристик ракет при режимах сплошного и кавитационного обтекания, результаты параметрических расчетов гидродинамических характеристик для наиболее характерных внешних обводов ракет. Рассмотрены методы расчета гидродинамики при упругих колебаниях корпуса ракеты, методы и результаты экспериментальных исследований кавитационного и газоструйного обтекания ракеты, газодинамические и тепловые процессы, протекающие при выходе ракеты из шахты, методы расчета динамики и нагрузок при старте ракет.

Для специалистов, работающих в области создания ракетных стартовых систем, может быть полезна аспирантам и студентам вузов.

УДК 629.762.2.085.5  
ББК 68.8

© ОАО «Государственный ракетный центр имени академика В.П. Макеева», 2009  
© ООО «Машиностроение-Полет», 2009  
© ОАО «Издательство «Машиностроение», 2009

ISBN 978-5-217-03443-7

# ОГЛАВЛЕНИЕ

---

---

Предисловие .....	3
Введение .....	6
<b>Глава 1. ОСНОВНЫЕ ДИНАМИЧЕСКИЕ ЗАКОНЫ ДВИЖЕНИЯ ТВЕРДОГО ТЕЛА В ПРОСТРАНСТВЕ .....</b>	<b>13</b>
1.1. Постановка задачи исследования и гидродинамические схемы обтекания ракет .....	13
1.2. Системы координат и кинематические характеристики, определяющие положение ракеты в пространстве .....	25
1.3. Уравнения движения твердого тела .....	29
1.4. Уравнение для давления в жидкости в подвижной системе координат .....	39
<b>Глава 2. СИЛОВОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ НЕВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ НА ДВИЖУЩЕЕСЯ В НЕЙ ТЕЛО .....</b>	<b>41</b>
2.1. Постановка задачи гидродинамики при движении тела в спокойной воде .....	41
2.2. Основные динамические параметры жидкости .....	47
2.3. Присоединенные массы тела .....	52
<b>Глава 3. ГИДРОДИНАМИКА ПРИ ДВИЖЕНИИ ТЕЛА ВО ВЗВОЛНОВАННОЙ ЖИДКОСТИ .....</b>	<b>57</b>
3.1. Характеристики плоских регулярных волн .....	57
3.2. Статистические характеристики ветровых волн .....	63
3.3. Спектральный метод исследования и структура морского ветрового волнения .....	70
3.4. Выбор расчетного спектра волнения .....	87
3.5. Общая постановка задачи гидродинамики при движении тела во взволнованной жидкости .....	92
<b>Глава 4. ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЕ УРАВНЕНИЯ НЕУПРАВЛЯЕМОГО ПРОСТРАНСТВЕННОГО ДВИЖЕНИЯ РАКЕТЫ .....</b>	<b>103</b>
4.1. Общая форма дифференциальных уравнений движения .....	103
4.2. Позиционные силы и моменты воздействия вязкой жидкости ..	107
4.3. Условия возникновения естественной кавитации на носовой части тела .....	117
4.4. Приближенное определение присоединенных масс для тела вращения с кормовыми стабилизаторами .....	124
4.5. Система дифференциальных уравнений продольного и углового движений осесимметричного тела в воде и при пересечении свободной поверхности воды .....	129
4.6. Приближенный метод расчета гидродинамических коэффициентов .....	139
4.7. Инженерный метод расчета донной газовой каверны .....	146

	4.8. Метод расчета воздействия струи жидкости на днище ракеты при движении в воде и пересечении поверхности воды . . . . .	149
<b>Глава 5.</b>	<b>ЧИСЛЕННЫЙ МЕТОД РАСЧЕТА ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ КОЭФФИЦИЕНТОВ И ПРИСОЕДИНЕННЫХ МАСС ТЕЛА ВРАЩЕНИЯ . . . . .</b>	<b>155</b>
	5.1. Постановка задачи гидродинамики при прохождении тела через экран . . . . .	155
	5.2. Вывод интегральных уравнений метода потенциала простого слоя . . . . .	163
	5.3. Вывод формул для расчета относительных скоростей и потенциалов . . . . .	169
	5.4. Основные расчетные формулы . . . . .	177
	5.5. Формулы для расчета гидродинамических коэффициентов и присоединенных масс . . . . .	180
	5.6. Методы вычислений при решении задачи обтекания потенциальным несжимаемым потоком идеальной жидкости тел вращения . . . . .	192
	5.7. Результаты расчета гидродинамических коэффициентов и сравнение с экспериментальными данными . . . . .	196
<b>Глава 6.</b>	<b>РАСЧЕТ ПРИСОЕДИНЕННЫХ МАСС И НАГРУЗОК НА РАКЕТУ ПРИ СТАРТЕ . . . . .</b>	<b>212</b>
	6.1. Анализ гидродинамических нагрузок при старте ракеты из затопленной шахты . . . . .	212
	6.2. Методы расчета присоединенной массы ракеты при движении в шахте . . . . .	224
	6.3. Метод расчета гидродинамических нагрузок на ракету с учетом спутного потока . . . . .	238
	6.4. Гидродинамика при упругих колебаниях корпуса ракеты . . . . .	246
<b>Глава 7.</b>	<b>ОБЩИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ КАВИТАЦИОННОГО ОБТЕКАНИЯ РАКЕТ . . . . .</b>	<b>257</b>
	7.1. Проблемы движения ракет в режиме кавитации . . . . .	257
	7.2. Экспериментальные исследования общих закономерностей кавитационного обтекания тел вращения . . . . .	259
	7.3. Анализ результатов экспериментальных исследований . . . . .	263
	7.4. Закономерности стационарного обтекания тел вращения с частичной кавитацией . . . . .	280
<b>Глава 8.</b>	<b>КАВИТАЦИОННОЕ ОБТЕКАНИЕ ТЕЛ ВРАЩЕНИЯ В ВЕРТИКАЛЬНОМ ПОТОКЕ ЖИДКОСТИ . . . . .</b>	<b>285</b>
	8.1. Исследование вертикальных каверн при свободном движении модели к поверхности воды . . . . .	285
	8.2. Методы экспериментального исследования каверн в вертикальных потоках жидкости . . . . .	287
	8.3. Результаты экспериментальных исследований . . . . .	290
	8.4. Приближенный расчет формы вертикальных каверн . . . . .	293
	8.5. Оценка гидродинамических коэффициентов при кавитационном обтекании тела вертикальным потоком жидкости . . . . .	298

8.6. Нагрузки, действующие на ракету при выходе из шахты и воды .....	309
<b>Глава 9. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОТРАБОТКА ГАЗОСТРУЙНОГО ОБТЕКАНИЯ РАКЕТЫ</b> .....	315
9.1. Кавитационное обтекание диска с истекающей из-под его кромок кольцевой струей .....	315
9.2. Исследование газовых струй в поперечном потоке жидкости ..	323
9.3. Результаты экспериментальной обработки кавитационного способа старта ракет .....	330
<b>Глава 10. МЕТОДЫ РАСЧЕТА КАВИТАЦИОННОГО ОБТЕКАНИЯ РАКЕТЫ</b> .....	342
10.1. Расчет параметров формирования нестационарных каверн при старте ракеты .....	342
10.2. Расчет кавитационного обтекания ракеты .....	352
10.3. Теоретическое исследование гидродинамических нагрузок при несимметричном смыкании каверны на круговой цилиндр .. .	365
10.4. Численный метод и результаты расчета гидродинамических нагрузок при кавитационном обтекании ракеты .....	377
<b>Глава 11. ГАЗОДИНАМИКА И ТЕПЛОМАССОБМЕН ПРИ СТАРТЕ РАКЕТЫ</b> .....	388
11.1. Общая постановка задач газодинамики и теплообмена при старте ракеты и картина течения газов в шахте .....	388
11.2. Дифференциальные уравнения продольного движения ракеты при старте из затопленной водой шахты .....	401
11.3. Газодинамика и продольное движение ракеты при старте из сухой шахты .....	405
<b>Глава 12. ИНЖЕНЕРНАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ ПРОДОЛЬНОГО И УГЛОВОГО ДВИЖЕНИЙ РАКЕТЫ ПРИ ЕЕ ВЫХОДЕ ИЗ ШАХТЫ И РЕАЛИЗУЮЩИХСЯ ПРИ СТАРТЕ НАГРУЗОК НА РАКЕТУ</b> .....	417
12.1. Вывод уравнений для расчета реакций опорно-ведущих поясов .....	417
12.2. Вывод дифференциальных уравнений продольного и углового движений ракеты при выходе из шахты .....	423
12.3. Инженерная математическая модель расчета нагрузок .....	429
Список литературы .....	438
Список основных обозначений .....	443