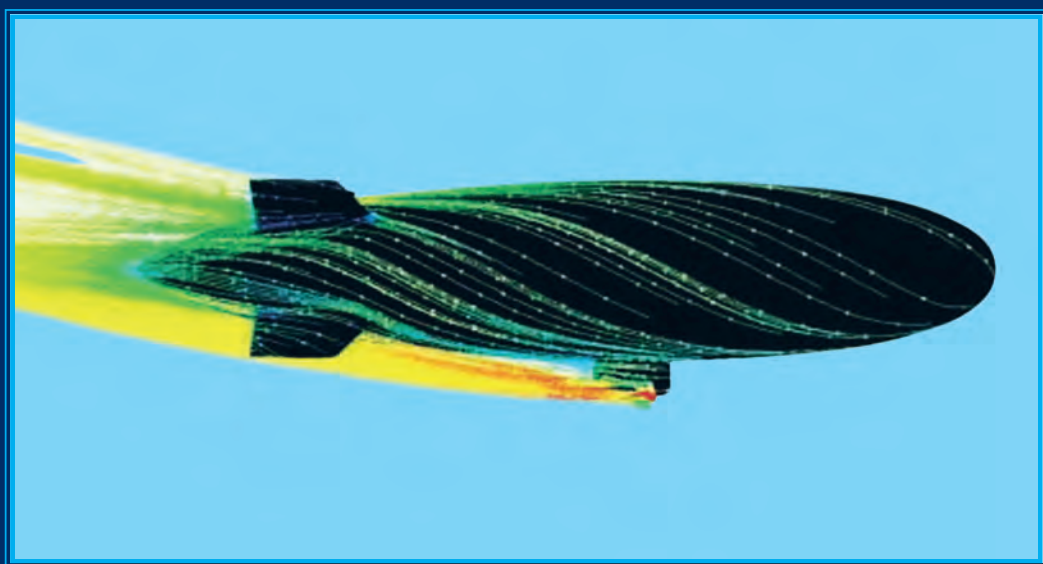


В. Т. Грумондз  
Н. В. Семенчиков  
О. В. Яковлевский

---

# АЭРОМЕХАНИКА ДИРИЖАБЛЯ



НАУКА

В. Т. Грумондз  
Н. В. Семенчиков  
О. В. Яковлевский

# АЭРОМЕХАНИКА ДИРИЖАБЛЯ

Под редакцией  
академика РАН Ю. А. РЫЖОВА



МОСКВА НАУКА 2017

УДК 517.925.7+523.566  
ББК 22.2:39.52  
Г90

Под редакцией академика РАН *Ю.А. Рыжова*

Рецензенты:

академик РАН *С.Л. Чернышев*  
доктор технических наук *В.Т. Калугин*

**Грумондз В.Т., Семенчиков Н.В., Яковлевский О.В.**

Аэромеханика дирижабля / В.Т. Грумондз, Н.В. Семенчиков, О.В. Яковлевский. — М. : Наука, 2017. — 424 с. — ISBN 978-5-02-039107-9

Рассматриваются вопросы аэродинамики и динамики полета дирижабля. Расчеты аэродинамических воздействий на дирижабль проводятся методами вычислительной аэродинамики. Исследованы аэродинамические характеристики дирижабля с учетом влияния экрана, а также влияния винтовых движителей, аэродинамические характеристики в установившемся потоке с поперечным сдвигом вблизи экрана и при движении через области атмосферной неоднородности струйного типа, аэродинамические силы и моменты инерционной природы, действующие на дирижабль. Представлены общие пространственные математические модели движения, модели продольного и бокового движений дирижабля, математические модели установившихся движений. Рассмотрены вопросы анализа возмущенных движений, устойчивости и управляемости дирижабля. Представлены результаты решения задач динамики дирижабля, притягиваемого тросом к земле. Большая часть вопросов аэродинамики и динамики полета дирижабля, рассмотренных в монографии, представлены в научной литературе впервые.

Для научных работников, инженеров и аспирантов.

ISBN 978-5-02-039107-9

© Грумондз В.Т., Семенчиков Н.В.,  
Яковлевский О.В., 2017

© Редакционно-издательское оформление.  
ФГУП Издательство «Наука», 2017

*Нашим Учителям  
Василию Тимофеевичу Дубасову  
и Тихону Андреевичу Грумондзу*

## ПРЕДИСЛОВИЕ

В конце XX столетия во всем мире снова возник значительный интерес к аэростатическим летательным аппаратам (АЛА), которые к этому времени уже более двух столетий использовались для полетов. К числу таких аппаратов относятся управляемые АЛА — дирижабли, расцвет эпохи которых пришелся на 30-е годы прошлого столетия.

Несмотря на то что по различным вопросам проектирования и эксплуатации, аэродинамики, динамики, устойчивости и управляемости дирижаблей различного назначения имеется весьма большое число различных журнальных публикаций и монографий, многие аэродинамические проблемы и вопросы динамики дирижаблей рассмотрены еще не в полной мере.

Хотя предлагаемая читателю книга посвящена в основном вопросам, связанным с аэродинамикой и динамикой дирижаблей классического типа, в ней приводится ряд материалов, касающихся дирижаблей и нетрадиционных форм.

Данной работой авторы хотели бы обратить внимание проектантов АЛА различного типа и назначения, а также специалистов, занимающихся их эксплуатацией, на ряд проблем аэродинамики и динамики дирижаблей, закономерности изменения аэродинамических и динамических характеристик дирижаблей вблизи и вдали от земной поверхности, которые могут проявиться при их полете (особенно в неспокойной атмосфере). Кроме того, авторам хотелось бы дать читателю ориентиры по количественной оценке коэффициентов аэродинамических сил и моментов дирижаблей в различных условиях.

В связи с этим большое внимание в монографии уделено аэродинамике дирижаблей в кинематически неоднородном потоке, аэродинамическому взаимодействию винтовых движителей и корпусов дирижаблей, динамике и устойчивости дирижаблей при совершении маневров в вертикальной и горизонтальной плоскостях, а также динамике системы «дирижабль-трос» при причаливании и удержании дирижабля вблизи земли.

Во многих случаях получить аэродинамические характеристики дирижаблей экспериментальным путем либо крайне затруднительно, либо вообще невозможно. Поэтому большая часть результатов определения аэродинамических характеристик АЛА, приведенных в книге, была получена с помощью численных методов. Сопоставление этих результатов с доступными экспериментальными данными для дирижаблей позволяет сделать вывод о том, что с помощью численных методов адекватно предсказывается изменение

коэффициентов аэродинамических сил и моментов в зависимости от определяющих параметров. Полученные с помощью численных методов значения этих коэффициентов во многих случаях (особенно при углах атаки и скольжения  $> 20^\circ$ ) следует рассматривать как оценочные.

Авторы выражают благодарность научному редактору книги, академику РАН Ю.А. Рыжову, много сделавшему для развития дирижаблестроения в нашей стране, а также рецензентам: академику РАН С.Л. Чернышеву и доктору технических наук, профессору В.Т. Калугину за замечания и ценные советы, направленные на улучшение содержания книги. Мы искренне благодарим А.Н. Колобкова за предоставленные материалы его исследований по вопросам аэродинамики оперенных корпусов дирижаблей и их подробное обсуждение, а также В.Л. Полищука за помощь в оформлении графической части книги.

Авторы надеются, что предлагаемая вниманию читателей книга позволит глубже понять проблемы аэродинамики и динамики современных дирижаблей, а материалы, приведенные в данной книге, окажутся полезными инженерам при проектировании и эксплуатации дирижаблей различного назначения.

Авторы будут признательны за все замечания и предложения, направленные на улучшение книги.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие .....	3
Введение .....	5

### Часть 1

#### АЭРОДИНАМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ РАЗРАБОТКИ ДИРИЖАБЛЕЙ

<b>Глава 1. Условия полета дирижабля, определяемые атмосферой Земли .....</b>	<b>12</b>
1.1. Состав и структура атмосферы .....	12
1.2. Основные физические параметры воздушной среды, стандартная атмосфера .....	15
1.3. Физические параметры реальной атмосферы .....	16
1.4. Опасные для полета дирижабля атмосферные явления .....	17
<b>Глава 2. Аэростатика дирижабля .....</b>	<b>19</b>
2.1. Основной аэростатический закон и архимедова сила дирижабля .....	19
2.2. Характеристики несущих газов .....	21
2.3. Аэростатическая подъемная сила дирижабля, ее зависимость от различных факторов .....	23
2.4. Аэростатическая балансировка .....	24
2.5. Максимальная высота аэростатического подъема дирижабля .....	28
<b>Глава 3. Методы определения аэродинамических характеристик дирижаблей .....</b>	<b>29</b>
3.1. Силы и моменты, действующие на движущийся дирижабль .....	29
3.2. Краткий обзор методов определения параметров обтекания и аэродинамических характеристик дирижаблей .....	29
3.3. Численный метод исследования пространственного обтекания дирижабля вязким газом .....	32
3.3.1. Общие замечания .....	32
3.3.2. Система уравнений для описания течения вязкого газа около дирижабля .....	33
3.3.3. Модели турбулентности .....	36

3.3.4. Граничные условия .....	37
3.3.5. Конечно-разностная аппроксимация системы уравнений .....	39
3.3.6. Расчет сил и моментов, действующих на обтекаемое тело .....	40
3.4. Примеры сравнения результатов численного моделирования с данными экспериментальных исследований .....	41

## **Глава 4. Аэродинамические характеристики неоперенных корпусов дирижаблей при установившемся поступательном движении в спокойной атмосфере вдали от экрана .....**

50

4.1. Картины течения при различных пространственных углах атаки, отрывные явления и вихревые системы .....	50
4.2. Распределение сил давления и трения по неоперенному корпусу дирижабля .....	53
4.3. Распределение локальных нормальных сил по длине корпуса.....	60
4.4. Влияние различных геометрических параметров и изменения числа Рейнольдса на суммарные аэродинамические характеристики неоперенных корпусов дирижаблей .....	61

## **Глава 5. Аэродинамические характеристики оперенных корпусов дирижаблей при установившемся поступательном движении в спокойной атмосфере вдали от экрана .....**

74

5.1. Аэродинамические характеристики оперенных корпусов с неотклоненными рулями .....	74
5.2. Влияние оперения на аэродинамические характеристики корпуса дирижабля .....	78
5.3. Аэродинамические характеристики корпуса в присутствии оперения.....	83
5.4. Влияние корпуса на аэродинамические характеристики оперения, установленного на корпусе .....	91
5.5. Влияние расположения и геометрических параметров гондолы на аэродинамические характеристики оперенного корпуса дирижабля (без учета отклонения рулей) .....	95
5.6. Аэродинамические характеристики дирижабля с корпусом кругового поперечного сечения и отклоненными рулями .....	103

## **Глава 6. Полуэмпирический метод расчета аэродинамических характеристик дирижабля в случае полета в спокойной атмосфере вдали от экрана .....**

109

6.1. Расчет коэффициента продольной силы неоперенного корпуса дирижабля с круговым поперечным сечением .....	109
6.2. Расчет коэффициента продольной силы оперенного корпуса дирижабля с круговым поперечным сечением .....	111
6.3. Расчет коэффициента нормальной силы и момента тангажа неоперенного корпуса дирижабля с круговым поперечным сечением.....	115
6.4. Расчет коэффициента нормальной силы и момента тангажа оперенного корпуса дирижабля с круговым поперечным сечением .....	118

<b>Глава 7. Влияние работы винтовых движителей на аэродинамические характеристики дирижабля при установившемся полете в спокойной атмосфере вдали от экрана</b> .....	122
7.1. Основные аэродинамические параметры винтов, критерии подобия при обтекании дирижабля с винтовыми движителями .....	122
7.2. Геометрические и кинематические параметры винтов и моделей дирижаблей при численном моделировании .....	123
7.3. Влияние работы винтовых движителей на аэродинамические характеристики малоразмерного дирижабля .....	125
7.3.1. Картины линий тока в окрестности дирижабля .....	125
7.3.2. Распределение коэффициентов давления и трения по поверхности оперенного корпуса в присутствии работающих винтов .....	125
7.3.3. Зависимости аэродинамических характеристик дирижабля с работающими винтами от углов атаки и скольжения .....	127
7.4. Влияние корпуса на аэродинамические характеристики винтов малоразмерного дирижабля .....	134
<b>Глава 8. Аэродинамические характеристики дирижабля при неустановившемся движении в спокойной атмосфере вдали от экрана</b> .....	138
8.1. Кинематические параметры, описание аэродинамических характеристик дирижабля при неустановившемся движении .....	138
8.2. Неустановившееся продольное движение дирижабля. Демпфирование колебаний.....	140
8.3. Неустановившееся боковое движение дирижабля. Производные демпфирующих моментов рыскания .....	143
<b>Глава 9. Аэродинамические характеристики дирижабля при установившемся полете в спокойной атмосфере вблизи экрана</b> .....	146
9.1. Аэродинамические характеристики дирижабля вблизи экрана в спокойной атмосфере без учета влияния работы винтов .....	146
9.1.1. Аэродинамические характеристики неоперенного корпуса дирижабля .....	146
9.1.2. Аэродинамические характеристики оперенного корпуса дирижабля вблизи экрана .....	153
9.2. Аэродинамические характеристики дирижабля вблизи экрана в спокойной атмосфере с учетом влияния работы винтов .....	153
9.3. Влияние корпуса дирижабля на аэродинамические характеристики винтов вблизи экрана .....	161
<b>Глава 10. Аэродинамические характеристики дирижабля при установившемся полете в потоке с поперечным сдвигом вдали от экрана</b> .....	165
10.1. Аэродинамические характеристики дирижабля в потоке с поперечным сдвигом вдали от экрана при отсутствии скольжения .....	166
10.2. Аэродинамические характеристики дирижабля в потоке с поперечным сдвигом вдали от экрана при движении со скольжением .....	172
	403

<b>Глава 11. Аэродинамические характеристики дирижабля в установившемся потоке с поперечным сдвигом вблизи экрана .....</b>	<b>178</b>
11.1. Аэродинамические характеристики дирижабля в потоке с поперечным сдвигом вблизи экрана (без учета работы винтов) .....	178
11.2. Влияние работы винтов на аэродинамические характеристики дирижабля в потоке со сдвигом вблизи экрана .....	184
11.3. Влияние корпуса дирижабля на аэродинамические характеристики винтов в потоке со сдвигом вблизи экрана .....	195
<b>Глава 12. Аэродинамические характеристики дирижабля при движении через области атмосферной неоднородности струйного типа .....</b>	<b>198</b>
12.1. Аэродинамические характеристики неоперенного корпуса дирижабля при движении через область атмосферной неоднородности струйного типа (без учета работы винтов) .....	198
12.2. Аэродинамические характеристики оперенного корпуса дирижабля при движении через область атмосферной неоднородности струйного типа (без учета работы винтов) .....	202
12.3. Влияние гондолы на аэродинамические характеристики дирижабля при перемещении через атмосферные струйные течения (без учета работы винтов) .....	210
12.4. Влияние работы винтов на аэродинамические характеристики оперенного корпуса дирижабля при его движении через области атмосферной неоднородности струйного типа .....	216
<b>Глава 13. Некоторые вопросы аэродинамического проектирования дирижаблей классического типа .....</b>	<b>222</b>
13.1. Вопросы аэродинамического проектирования неоперенного корпуса .....	222
13.2. Выбор расположения и геометрических параметров оперения дирижабля классического типа .....	226
13.3. К выбору места расположения на дирижабле винтовых движителей ....	229
<b>Литература к части 1 .....</b>	<b>229</b>

## Часть 2

### ДИНАМИКА ПОЛЕТА ДИРИЖАБЛЯ

<b>Глава 14. Аэродинамические силы и моменты инерционной природы. Присоединенные массы и моменты инерции дирижабля .....</b>	<b>234</b>
14.1. Общие вопросы расчета присоединенных масс и моментов инерции дирижабля .....	234
14.1.1. Кинетическая энергия идеальной жидкости. Общие выражения для присоединенных масс .....	235
14.1.2. Общие выражения сил и моментов инерционной природы, действующих на дирижабль в воздухе вдали от земли .....	242

14.2. Методы определения присоединенных масс и моментов инерции дирижабля .....	245
14.2.1. Точные аналитические методы для простейших тел и трехосных эллипсоидов .....	245
14.2.2. Приближенные методы расчета присоединенных масс дирижабля .....	247
14.2.2.1. Метод эквивалентного эллипсоида .....	247
14.2.2.2. Метод, основанный на гипотезе плоских сечений .....	248
14.2.3. Экспериментальные методы определения присоединенных масс и моментов инерции дирижабля .....	250
14.3. Влияние земной поверхности (экрана) на присоединенные массы дирижабля .....	252
<b>Глава 15. Общие уравнения движения дирижабля в свободном полете .....</b>	<b>255</b>
15.1. Системы координат и углы, используемые в задачах механики полета дирижабля .....	255
15.2. Общие уравнения пространственного движения дирижабля в свободном полете .....	260
15.3. Уравнения продольного движения дирижабля .....	268
15.4. Уравнения бокового движения дирижабля .....	269
<b>Глава 16. Установившиеся движения дирижабля .....</b>	<b>271</b>
16.1. Общая математическая модель пространственных установившихся движений дирижабля.....	271
16.2. Установившиеся движения дирижабля в вертикальной плоскости.....	274
16.2.1. Общий случай установившихся движений дирижабля в вертикальной плоскости .....	274
16.2.2. Полет дирижабля по пологим траекториям .....	275
16.2.3. Прямолинейный крейсерский полет дирижабля на постоянной высоте с заданной постоянной скоростью.....	276
16.2.4. Прямолинейный полет дирижабля по наклонным траекториям при немалом постоянном угле наклона траектории к горизонту и учете некоторых нелинейных составляющих аэродинамических характеристик.....	277
16.3. Установившиеся движения дирижабля в горизонтальной плоскости .....	280
16.3.1. Установившаяся горизонтальная циркуляция в общем случае .....	280
16.3.2. Горизонтальная циркуляция дирижабля при учете составляющих аэродинамических характеристик, нелинейных по углу скольжения .....	283
16.3.3. Определение окружной скорости при нелинейной зависимости коэффициента лобового сопротивления от воздушной скорости и угла отклонения рулей.....	286
16.4. Установившиеся движения дирижабля по пространственной спирали .....	287
16.5. Статическая устойчивость дирижабля в установившемся полете .....	289
	405

<b>Глава 17. Динамика возмущенного движения дирижабля .....</b>	<b>291</b>
17.1. Уравнения первого приближения продольного возмущенного движения .....	291
17.2. Условия устойчивости продольного движения дирижабля .....	293
17.3. Управляемость дирижабля в продольном движении .....	296
17.4. Условия устойчивости бокового движения .....	301
 <b>Глава 18. Динамика дирижабля на этапе его притягивания тросом к земле (швартовки) с помощью лебедки .....</b>	<b>303</b>
18.1. Математическая модель равновесия дирижабля на стоянке.....	303
18.2. Динамика пространственного движения дирижабля, прикрепленного тросом к причальному устройству на земле, в квазистационарной постановке .....	307
18.2.1. Постановка задачи .....	307
18.2.2. Математическая модель движения троса в квазистационарной постановке .....	308
18.2.3. Математическая модель движения дирижабля с учетом наличия троса .....	311
18.2.4. Математическая модель ветра в приземном слое атмосферы .....	313
18.2.5. Математическая модель притягивающего устройства (лебедки) .....	317
18.2.6. Математическая модель демпфера .....	317
 <b>Глава 19. Алгоритм расчета и некоторые результаты численного моделирования динамики дирижабля, прикрепленного тросом к причальному устройству на земле, в квазистационарном приближении .....</b>	<b>319</b>
19.1. Алгоритм решения задачи динамики системы «трос—дирижабль» .....	319
19.2. Некоторые вычислительные особенности алгоритма .....	324
19.3. Некоторые результаты численного анализа динамики движения дирижабля, прикрепленного тросом к причальному устройству на земле ...	325
19.3.1. Исходные данные и некоторые предварительные замечания.....	325
19.3.2. Переход системы «трос—дирижабль» из произвольного состояния в установившееся .....	328
19.3.3. Движение системы «трос—дирижабль» после резкого изменения плавучести дирижабля .....	328
19.3.4. Движение системы «трос—дирижабль» при порывах ветра .....	329
19.3.5. Движение дирижабля при притягивании его лебедкой к земле в режиме причаливания.....	331
19.3.6. Усилия в точке крепления троса к дирижаблю в моменты резкого натяжения и влияние демпфера на них.....	331
 <b>Глава 20. Математическая модель движения дирижабля, прикрепленного тросом к причальному устройству на земле, в динамической постановке .....</b>	<b>333</b>
20.1. Математическая модель движения троса в динамической постановке .	333
20.2. Выбор количества элементов троса в расчетной схеме .....	338

<b>Глава 21. Динамика полета «малого» гипотетического дистанционно пилотируемого дирижабля .....</b>	<b>339</b>
21.1. Схема и геометрические характеристики гипотетического «малого» дистанционно пилотируемого дирижабля Д1 .....	340
21.2. Масса, центровка и момент инерции $J_z$ дирижабля Д1 .....	342
21.3. Экспериментальные аэродинамические характеристики дирижабля Д1 в продольном движении .....	342
21.4. Вращательные производные в продольном движении .....	343
21.5. Присоединенные массы и присоединенные моменты инерции в продольном движении .....	346
21.6. Параметры установившихся движений дирижабля Д1 в вертикальной плоскости по горизонтальным траекториям .....	348
21.7. Параметры установившихся движений дирижабля Д1 в вертикальной плоскости по прямолинейным наклонным траекториям .....	354
21.8. Параметры траекторий взлета и посадки дирижабля Д1 .....	354
21.8.1. Взлет с отклонением вектора тяги .....	357
21.8.2. Траектории посадки дирижабля Д1 с положительной и отрицательной плавучестью .....	361

<b>Глава 22. Динамика полета «большого» гипотетического дирижабля с различными вариантами кормового оперения .....</b>	<b>366</b>
22.1. Схема гипотетического «большого» дирижабля Д2. Схемы Д2.1 и Д2.2 дирижабля Д2 с различными параметрами кормового оперения. Геометрические характеристики дирижабля Д2 .....	366
22.2. Масса, центровка и моменты инерции дирижаблей Д2.1 и Д2.2 .....	368
22.3. Экспериментальные аэродинамические характеристики дирижаблей Д2.1 и Д2.2 в продольном движении .....	368
22.4. Вращательные производные в продольном движении .....	371
22.5. Присоединенные массы и присоединенные моменты инерции дирижаблей Д2.1 и Д2.2 в продольном движении .....	371
22.6. Суммарные выражения для аэродинамических коэффициентов дирижаблей Д2.1 и Д2.2 .....	371
22.7. Параметры установившихся движений в вертикальной плоскости по горизонтальным траекториям .....	372
22.8. Параметры установившихся движений в вертикальной плоскости по наклонным траекториям .....	377
22.9. Продольная устойчивость дирижабля Д2 в модификациях Д2.1 и Д2.2 .....	381
22.10. Устойчивость углового продольного движения дирижабля Д2 в модификациях Д2.1 и Д2.2 .....	384
22.11. Продольная управляемость дирижаблей Д2.1 и Д2.2 .....	387

<b>Глава 23. Динамика полета аэростатического дистанционно пилотируемого летательного аппарата гибридной схемы .....</b>	<b>391</b>
23.1. Математическая модель движения гибридного аэростатического летательного аппарата как аэротросовой системы.....	391

23.2. Алгоритм и некоторые результаты численного исследования свойств гибридной аэротросовой системы .....	394
23.3. Численный анализ в квазистатической постановке устойчивости по высоте установившегося движения гибридной аэротросовой системы .....	394
23.4. Оптимизация параметров гибридной аэротросовой системы по критерию максимума относительной полезной нагрузки .....	396
<b>Литература к части 2</b> .....	398

## АВТОРЫ

### **ГРУМОНДЗ Валерий Тихонович**

Специалист в области теории движения летательных, подводных и двусредных аппаратов, аэрогидродинамики, теории устойчивости движения и нелинейных колебаний. Доктор физико-математических наук (1991), профессор (1993).

Выпускник механико-математического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова. Профессор кафедры динамики и управления летательных аппаратов Московского авиационного института (Национального исследовательского университета), начальник отдела аэродинамики Государственного научно-производственного предприятия «Регион».

Автор более 120 научных публикаций, в том числе семи монографий, двенадцати учебных пособий. Научный руководитель более десяти аспирантов.

Участник ряда научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, относящихся к аэродинамике, гидродинамике и динамике перспективных летательных, космических, подводных и двусредных аппаратов различного назначения, в том числе высокоскоростных подводных аппаратов.



## СЕМЕНЧИКОВ Николай Витальевич



Специалист в области экспериментальных и теоретических исследований аэродинамики летательных аппаратов и их элементов, вихревых, струйных и отрывных течений. Кандидат технических наук.

Лауреат Премии Президента РФ в области образования (2000 г.).

Окончил МАИ им. С. Орджоникидзе в 1964 г. Работает в МАИ (НИУ), профессор кафедры аэродинамики летательных аппаратов. Автор более 120 научных публикаций и изобретений.

Основные научные результаты получены при изучении особенностей обтекания и аэродинамических характеристик крыльев, корпусов и компоновок летательных аппаратов различного назначения и аэростатических летательных аппаратов при безотрывном и отрывном обтекании.

## ЯКОВЛЕВСКИЙ Олег Васильевич



Специалист в области экспериментальных и теоретических исследований струйных и отрывных течений при обтекании летательных аппаратов и их элементов. Кандидат технических наук.

Лауреат Премии Президента РФ в области образования (2000 г.).

Окончил МФТИ в 1955 г. Работал в ЦИАМ им. П.И. Баранова (с 1955 по 1971 г.), с 1971 по 2014 г. — в МАИ, где возглавлял отраслевую аэродинамическую лабораторию, в 1980 г. перешел на педагогическую работу (с 2000 по 2014 г. профессор кафедры аэродинамики летательных аппаратов МАИ). Поставил и читал курсы промышленной аэродинамики и аэроакустики.

Автор более 130 научных публикаций и изобретений. Является одним из авторов учебника «Аэродинамика летательных аппаратов» под ред. Г.А. Колесникова.

Основные научные результаты получены при изучении распространения турбулентных струй газов различной плотности (гелий, углекислый газ, фреон-12) в воздухе. Сформулирована гипотеза об универсальности эжекционных свойств турбулентных струй газа и на ее основе разработан приближенный метод расчета изменения их физических параметров при распространении в окружающей среде.

Большой практический интерес представляют результаты исследования и установление причины потери подъемной силы самолетов вертикального взлета и посадки, вызванной обтеканием крыла самолета потоком воздуха, индуцированным струями подъемных двигателей. Разработан инженерный метод расчета этих потерь.

Создан приближенный метод расчета аэродинамических характеристик крыла, оснащенного взлетно-посадочной механизацией.

Научное издание

**Грумондз Валерий Тихонович**  
**Семенчиков Николай Витальевич**  
**Яковлевский Олег Васильевич**

**АЭРОМЕХАНИКА ДИРИЖАБЛЯ**

Редактор *Л.В. Филиппова*

Художник *В.Ю. Яковлев*

Корректоры *А.Б. Васильев, Р.В. Молоканова,*  
*Е.Л. Сысоева, Т.И. Шеповалова*

Подписано к печати 01.03.2016  
Формат  $70 \times 100^{1/16}$ . Гарнитура Таймс.  
Печать офсетная

Усл.печ.л. 34,5. Усл.кр.-отт. 35,2. Уч.-изд.л. 37,5  
Тираж 500 экз. Тип. зак.

ФГУП Издательство «Наука»  
117997, Москва, Профсоюзная ул., 90

Е-mail: [secret@naukaran.com](mailto:secret@naukaran.com)  
[www.naukaran.com](http://www.naukaran.com)

ФГУП Издательство «Наука»  
(Типография «Наука»)  
121099, Москва, Шубинский пер., 6

**Федеральное государственное унитарное предприятие**

**«Издательство «Наука»**

117997 г. Москва, ул. Профсоюзная, 90  
 тел.: +7 (495) 276-77-35; факс: +7 (499) 724-89-24  
 e-mail: [secret@naukaran.com](mailto:secret@naukaran.com)  
[www.naukaran.com](http://www.naukaran.com)

**Филиалы ФГУП «Издательство «Наука»:**

**Санкт-Петербургский филиал**

199034 г. Санкт-Петербург, Менделеевская линия, 1  
 тел.: +7 (812) 328-39-12; факс: +7 (812) 328-00-51  
 e-mail: [main@nauka.nw.ru](mailto:main@nauka.nw.ru)  
[www.naukaspb.com](http://www.naukaspb.com)

**Новосибирский филиал**

630077 г. Новосибирск, ул. Станиславского, 25  
 тел.: +7 (383) 343-35-45  
 e-mail: [sib-nauka@yandex.ru](mailto:sib-nauka@yandex.ru)  
[www.sibnauka.ru](http://www.sibnauka.ru)

**Издательская фирма «Восточная литература»**

121099 г. Москва, Шубинский пер., 6  
 тел.: +7 (499) 241-02-52  
 e-mail: [vostok.kom@gmail.com](mailto:vostok.kom@gmail.com)  
[www.vostlit.ru](http://www.vostlit.ru)

## АДРЕСА МАГАЗИНОВ «АКАДЕМКНИГА»

### «Книга-почтой»

121099 Москва, Шубинский пер., 6  
+7 (495) 780-33-60  
e-mail: [info@litras.ru](mailto:info@litras.ru)  
[www.naukaran.com](http://www.naukaran.com)

199034 Санкт-Петербург, Менделеевская линия, 1  
+7 (812) 328-38-12  
e-mail: [naukaspb1@yandex.ru](mailto:naukaspb1@yandex.ru)

### Магазины «Академкнига» с указанием букинистических отделов

660049 Красноярск, ул. Сурикова, 45  
+7 (3912) 27-03-90 [akademkniga@bk.ru](mailto:akademkniga@bk.ru)

117312 Москва, ул. Вавилова, 55/7  
+7 (499) 124-55-00 (бук. отдел)

117997 Москва, Профсоюзная ул., 90  
+7 (495) 276-11-57, доб. 1011

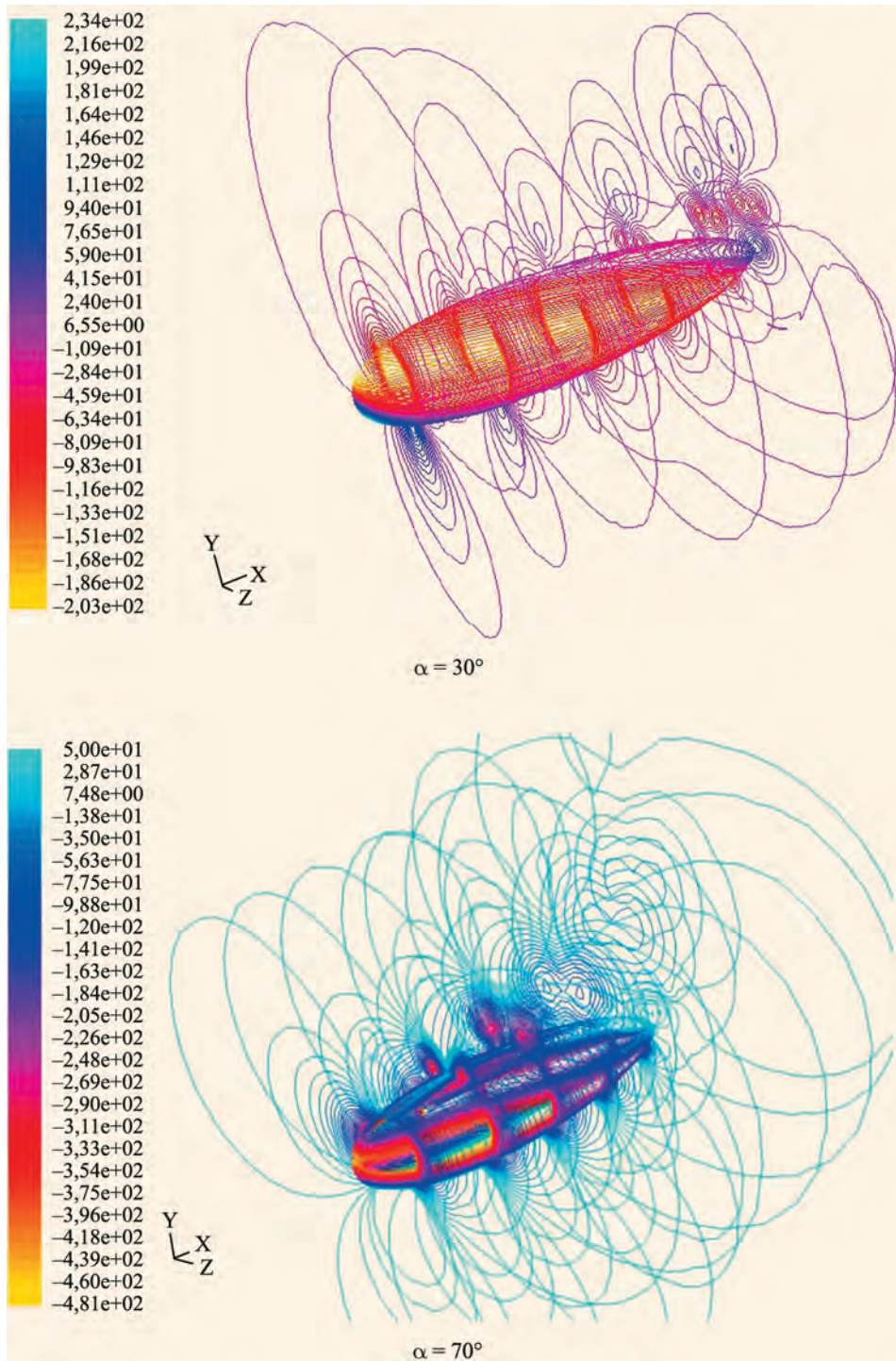
119192 Москва, Мичуринский проспект, 12  
+7 (495) 932-74-79 (бук. отдел)

101000 Москва, Б. Спасоглинищевский пер., 8 стр. 4  
+7 (495) 624-72-19 (бук. отдел)

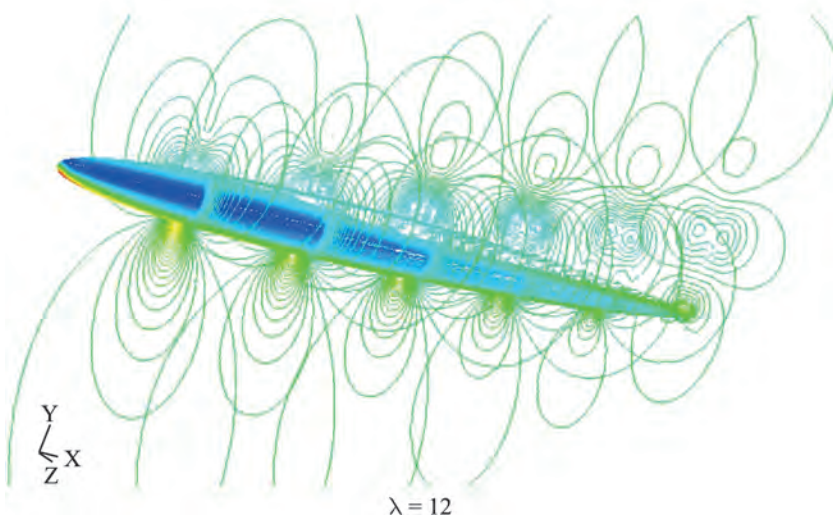
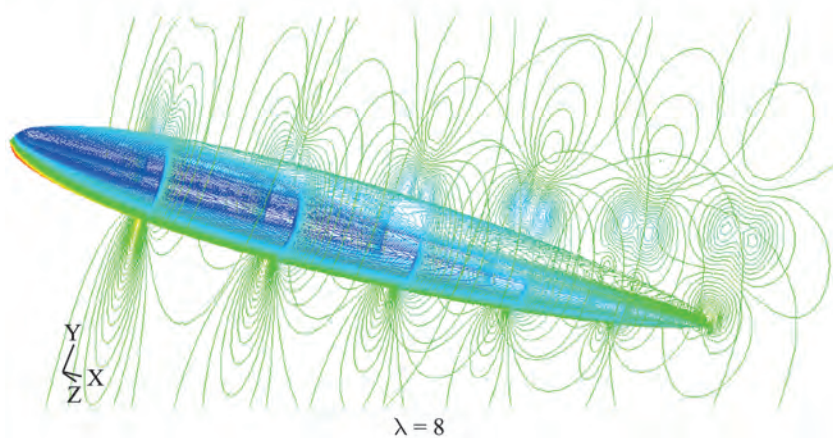
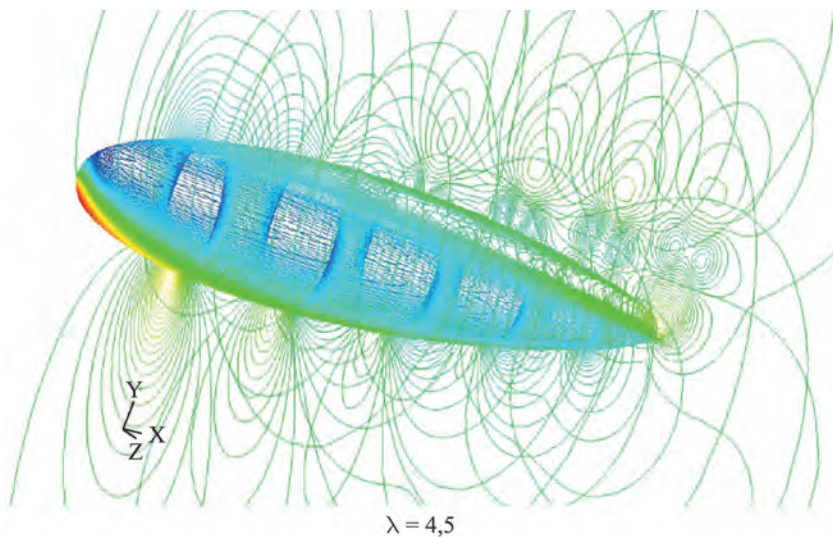
142290 Пушкино, Московской обл., МКР «В», 1  
+7 (4967) 73-38-80 (бук. отдел)

199034 Санкт-Петербург, Менделеевская линия, 1  
+7 (812) 328-38-12

191104 Санкт-Петербург, Литейный просп., 57  
+7 (812) 273-13-98 [academkniga.spb@bk.ru](mailto:academkniga.spb@bk.ru) (бук. отдел)



**Рис. 4.2.** Обобщенные картины распределения давления в окрестности неоперенного корпуса дирижабля при больших углах атаки,  $Re = 5,3 \times 10^6$



**Рис. 4.3.** Линии равного давления в окрестности неоперенного корпуса дирижабля при больших углах атаки,  $\alpha = 30^\circ$ ,  $\text{Re} = 1,6 \times 10^6$

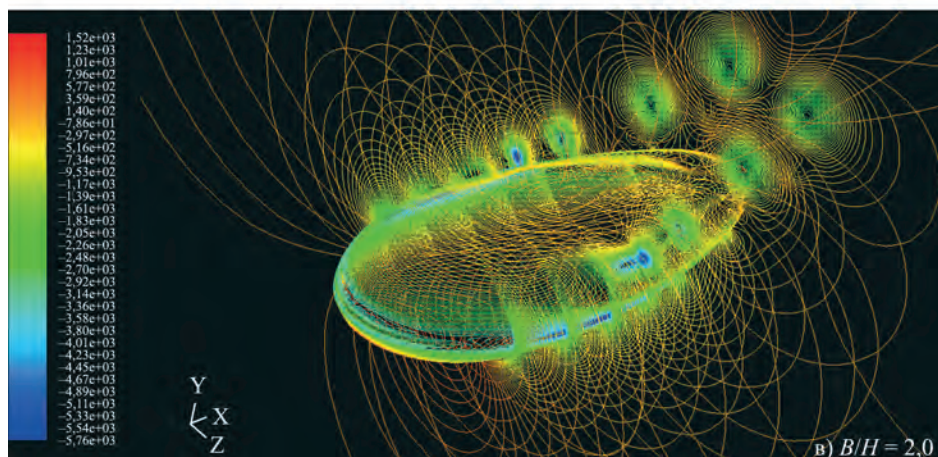
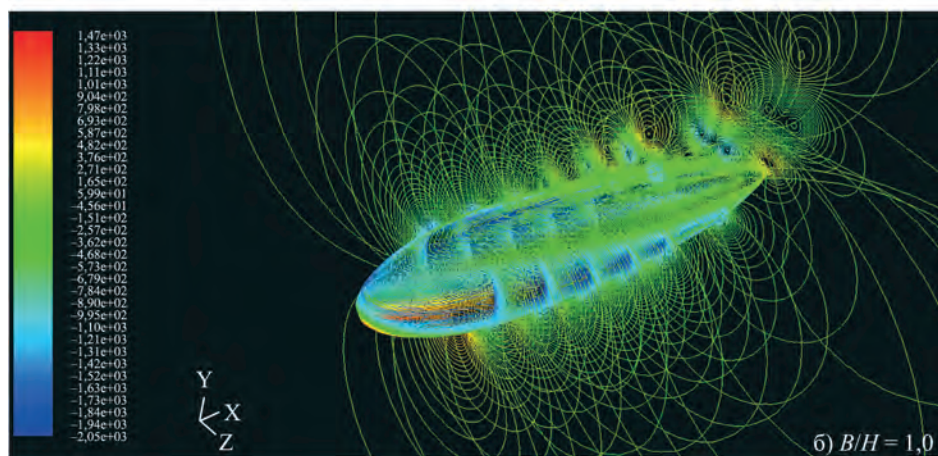
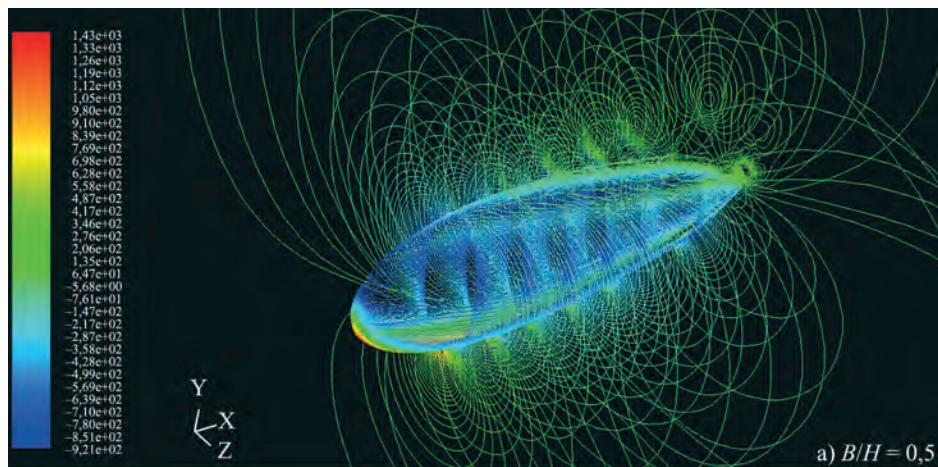
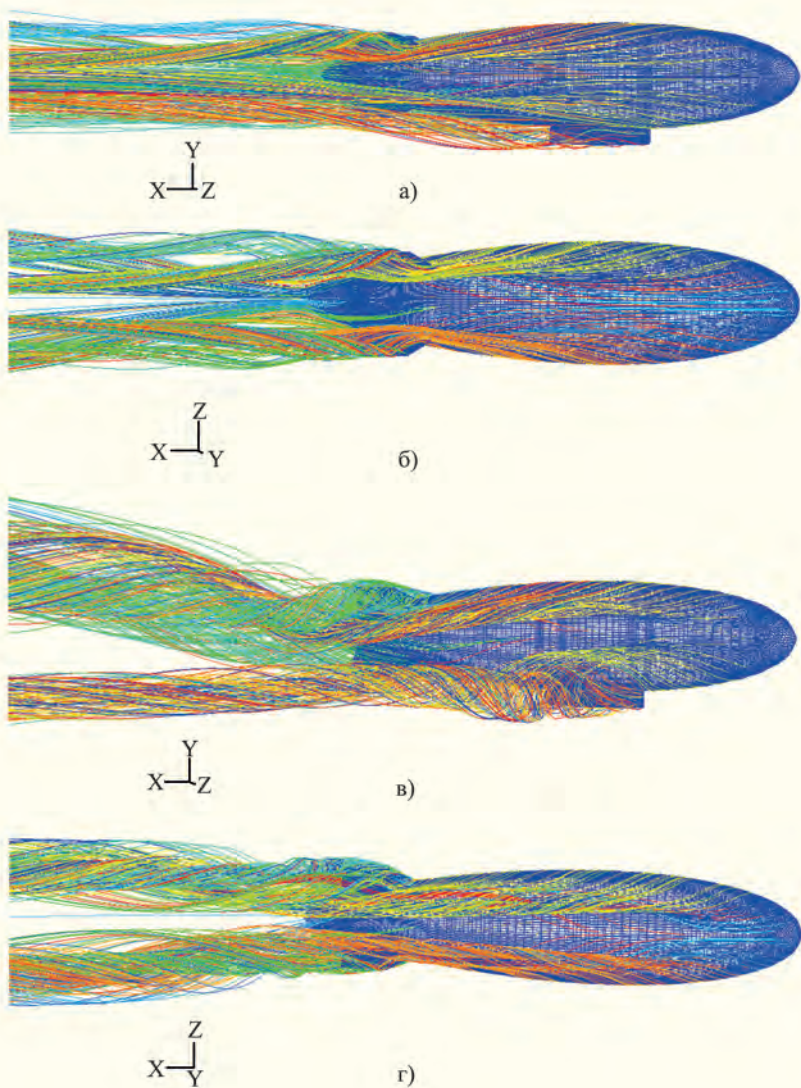
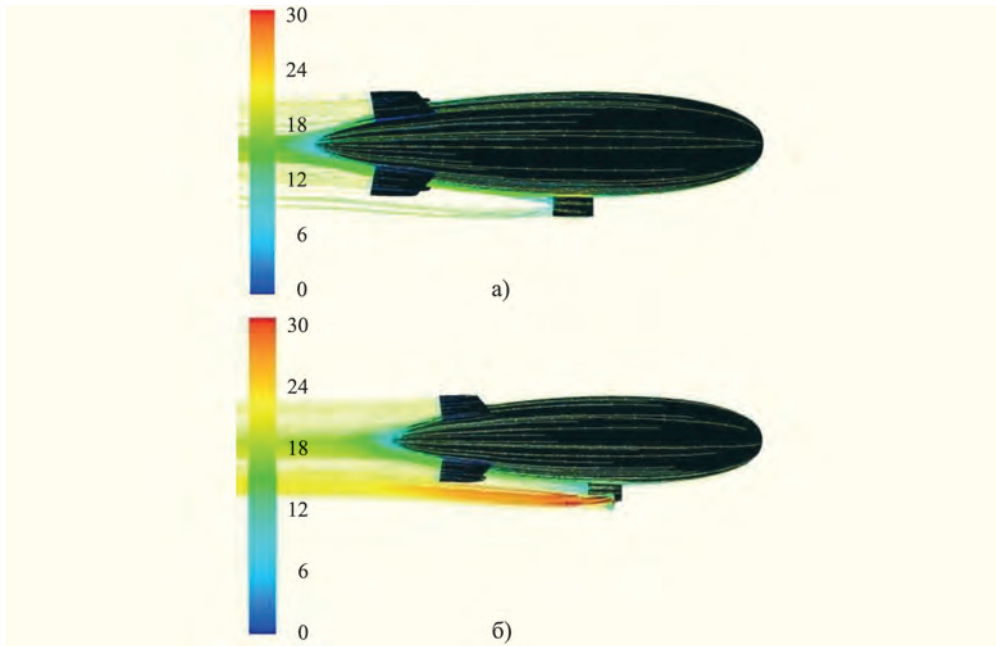


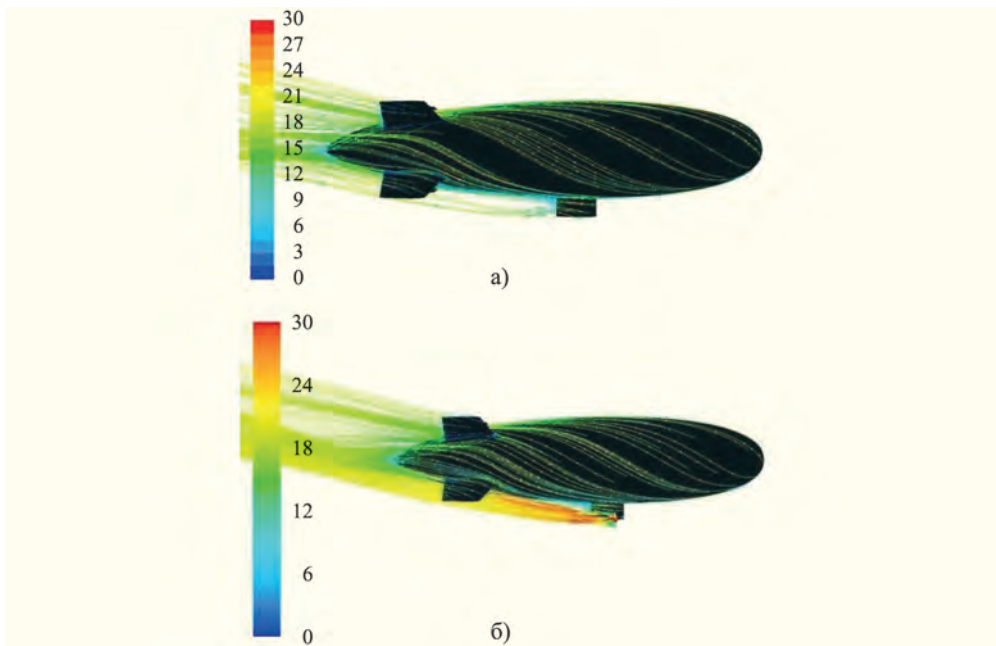
Рис. 4.5. Линии равного давления в различных сечениях в окрестности неоперенного корпуса с удлинением,  $\lambda = 4,5$ ,  $\alpha = 40^\circ$ ,  $Re = 4 \times 10^6$



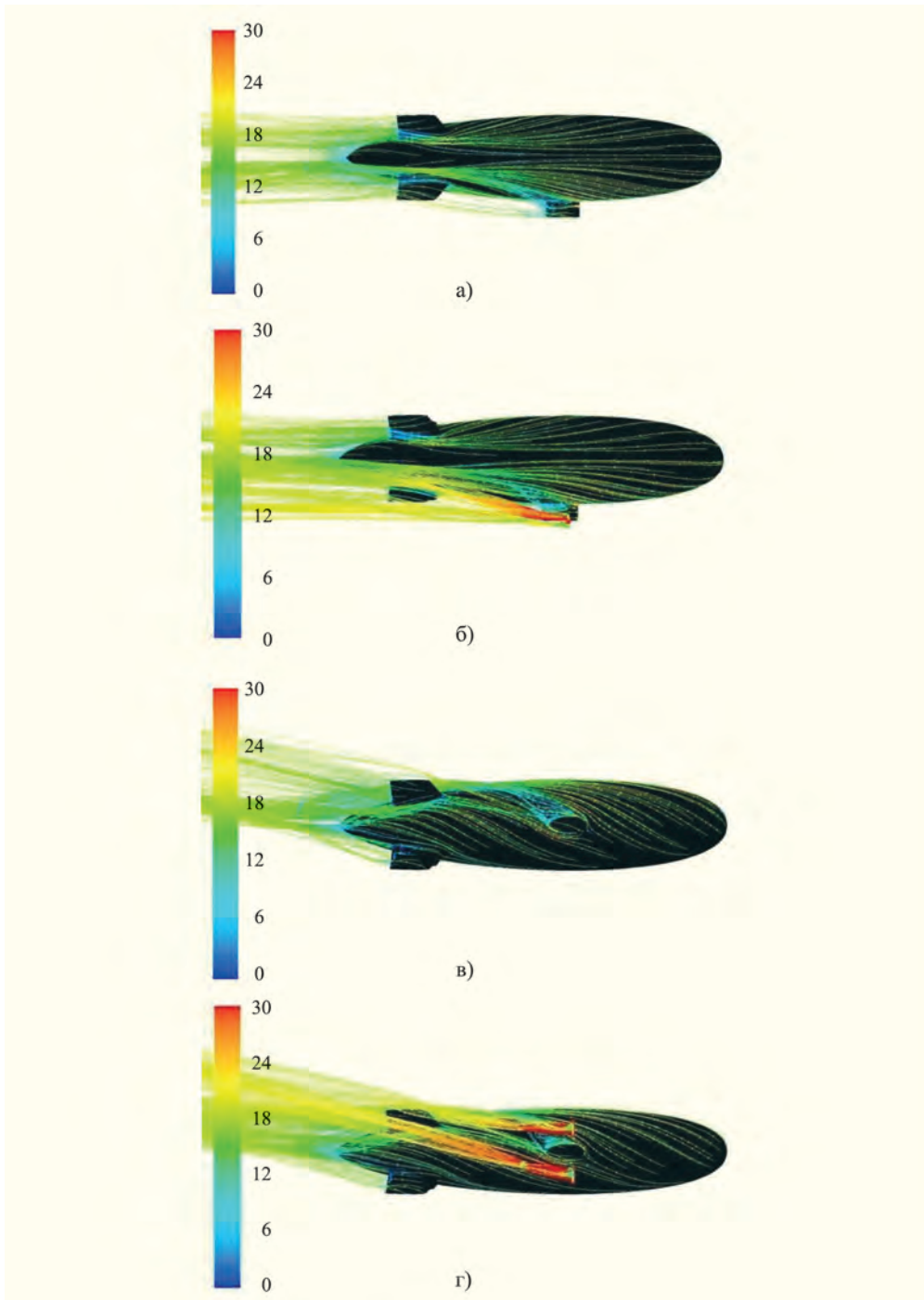
**Рис. 5.19.** Картины линий тока в окрестности корпуса дирижабля с гондолой и без гондолы, подветренная сторона,  $\alpha = 0$ ,  $Re = 3,2 \times 10^6$ , а – корпус с гондолой,  $\beta = 20^\circ$ ; б – корпус без гондолы,  $\beta = 20^\circ$ ; в – корпус с гондолой,  $\beta = 40^\circ$ ; г – корпус без гондолы,  $\beta = 40^\circ$



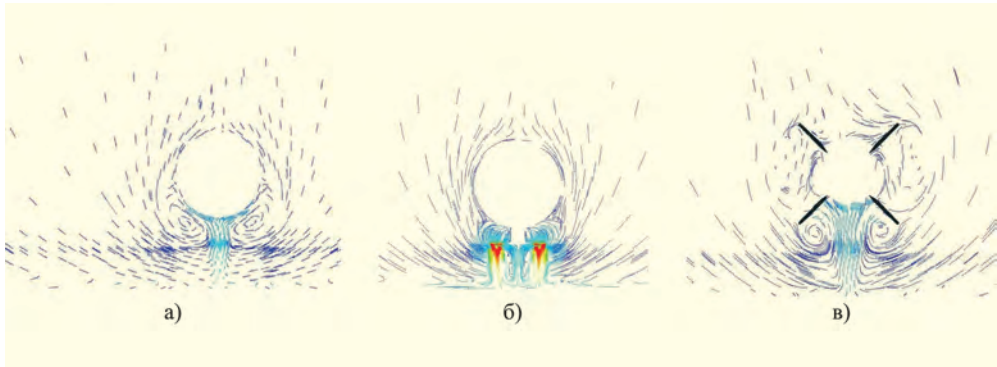
**Рис. 7.3.** Картины линий тока в окрестности дирижабля при  $\alpha = 0$ ,  $\beta = 0$ ;  $V_\infty = 20$  м/с;  $\lambda = 0,263$ ; а – без винтов; б – с винтами



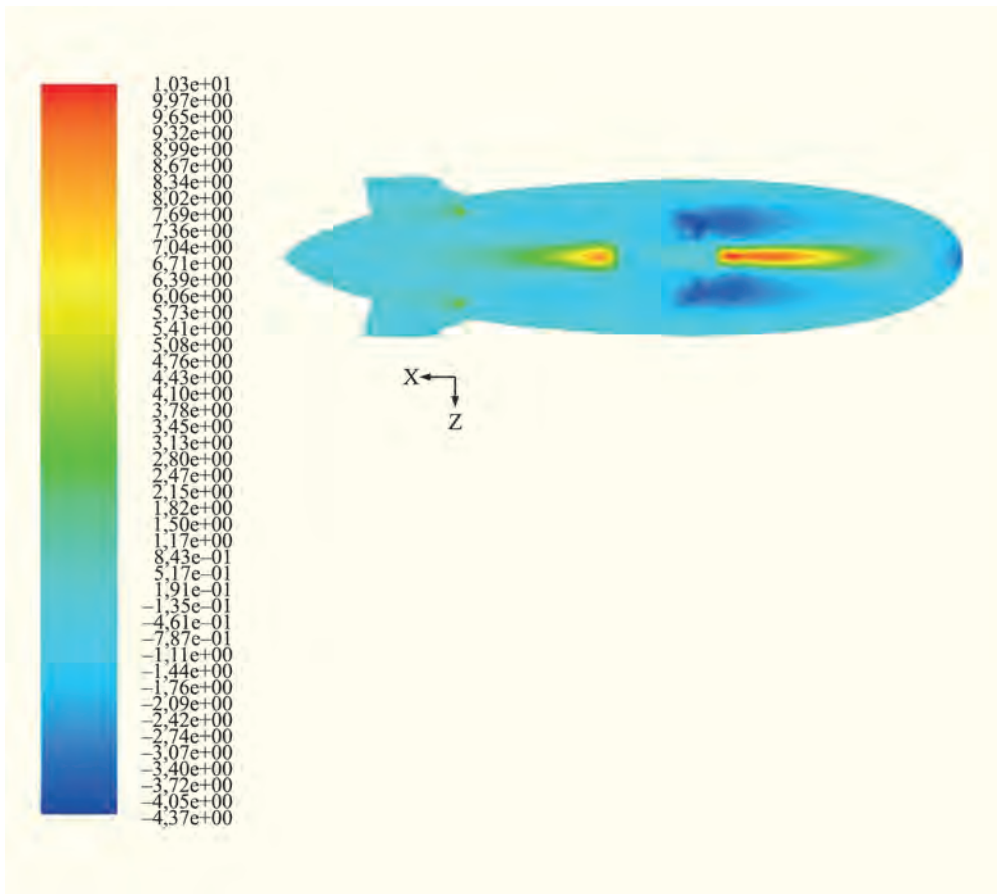
**Рис. 7.4.** Картины линий тока в окрестности дирижабля при  $\alpha = 20^\circ$ ,  $\beta = 0$ ;  $V_\infty = 20$  м/с;  $\lambda = 0,263$ ; а – без винтов; б – с винтами



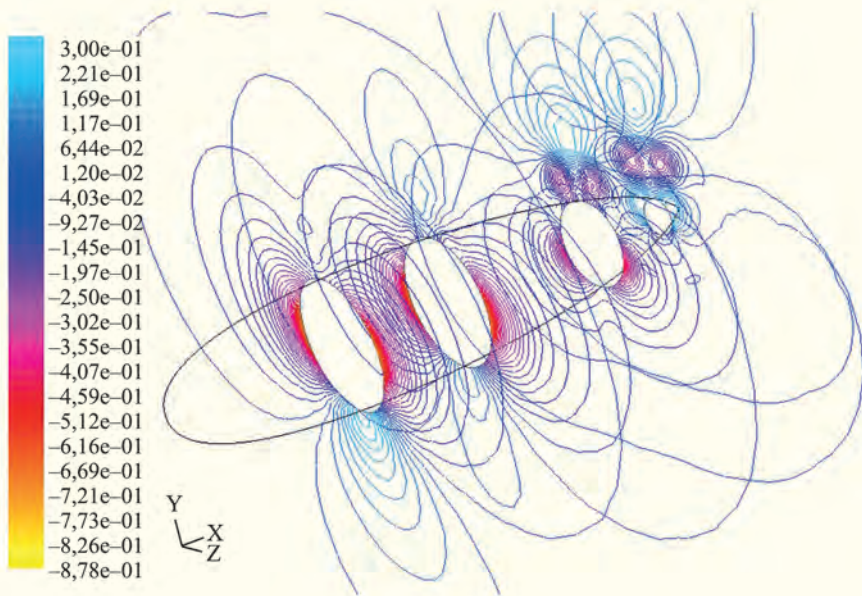
**Рис. 7.5.** Картины линий тока в окрестности дирижабля при  $\alpha = 0$ ,  $\beta = 20^\circ$ ;  $V_\infty = 20$  м/с;  $\lambda = 0,263$ ; *а, б* – в плоскости изменения углов атаки, *а* – без винтов, *б* – с винтами; *в, г* – в плоскости изменения угла скольжения, *в* – без винтов, *г* – с винтами



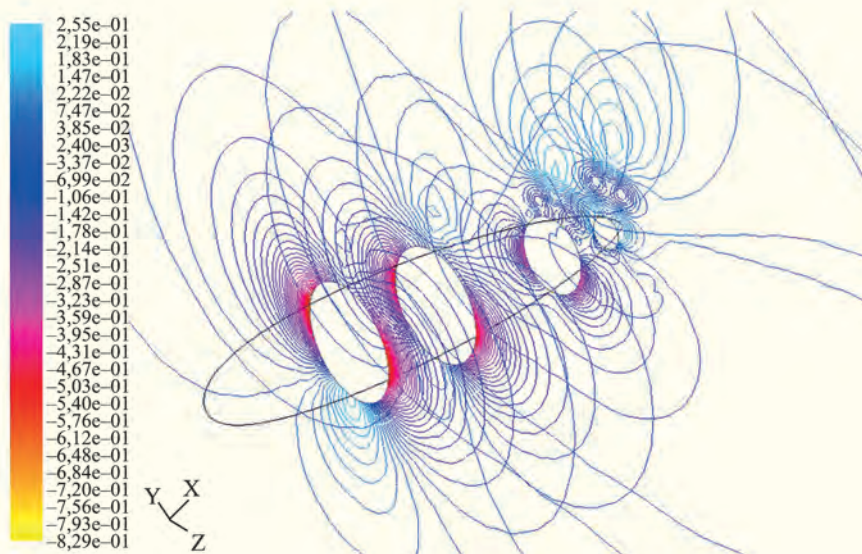
**Рис. 9.6.** Примеры картин линий тока в перпендикулярных оси корпуса плоскостях при  $\bar{H} = 1,2$ ;  $M_0 = 0,69$ ;  $a - \bar{x} = 0,2$ ;  $б - \bar{x} = 0,4$ ;  $в - \bar{x} = 0,8$



**Рис. 9.7.** Распределение давления по поверхности корпуса, обращенной к экрану:  $\bar{H} = 1,2$ ;  $M_0 = 0,69$



а)  $\varepsilon = 0$



б)  $\varepsilon = 0,1$

**Рис. 10.1.** Распределение давления в различных поперечных сечениях неоперенного корпуса дирижабля при  $\alpha = 30^\circ$  и  $\beta = 0$