

ЗАНИМАТЕЛЬНАЯ ФИЗИКА

МАНГА

ГИДРОДИНАМИКА

Такэи Масахиро
Мацусита Май



Занимательная физика

ГИДРОДИНАМИКА

Манга

マンガでわかる
流体力学

武居 昌宏／著
松下 マイ／作画
オフィスsawa／制作



ОБРАЗОВАТЕЛЬНАЯ МАНГА

ЗАНИМАТЕЛЬНАЯ ФИЗИКА

ГИДРОДИНАМИКА

Такэи Масахиро

Мацусита Май

Перевод
с японского
Клионского А.Б.



ДМК
ПРЕСС
ИЗДАТЕЛЬСТВО

ОДЭКА

Москва
Додэка, ДМК Пресс, 2015

УДК 532.5.013
ББК 22.253.3
М31

Масахиро, Такэи.

М31 Занимательная физика. Гидродинамика. Манга. / Такэи Масахиро (автор), Мацусита Май (худож.); пер. с яп. Клионского А. Б. — М. : ДМК Пресс, 2015. — 208 с. : ил. — (Серия «Образовательная манга»). — Доп. тит. л. яп. — ISBN 978-5-97060-117-4.

Аканэ, Сираиси и Эки учатся в одной школе и дополнительно занимаются в физическом кружке. Аканэ – самая старшая, она староста кружка, Сираиси – самый умный, а Эки – самая непредсказуемая и верит в оккультные науки. Однажды Эки приснился вещий сон, в котором упал самолёт и утонул корабль. И тогда у неё возник вопрос – а почему вообще самолёты летают, а корабли не тонут. Оказалось, что наука, которая может дать ответ на эти и другие вопросы, называется гидродинамикой или механикой текучих сред, и Эки и Аканэ попросили Сираиси рассказать про неё.

Вместе с нашими героями мы совершим увлекательное путешествие в мир текучих сред и узнаем много нового и интересного об их свойствах и законах, которым они подчиняются, и которые мы используем в повседневной жизни, даже не догадываясь об этом.

УДК 532.5.013
ББК 22.253.3

Original Japanese edition
Manga de Wakaru Ryuutai Rikigaku (Manga Guide: Fluid Dynamics)
Masahiro Takei (Author), Mai Matsushita (Illustrator) and Office sawa (Producer)
Russian language edition copyright © 2015 by DMK Press
Translation rights arranged with Ohmsha, Ltd.

Все права защищены. Никакая часть этого издания не может быть воспроизведена в любой форме или любыми средствами, электронными или механическими, включая фотографирование, ксерокопирование или иные средства копирования или сохранения информации, без письменного разрешения издательства.

ISBN 978-4-274-06773-0 (яп.) Copyright © 2009 by Masahiro Takeo and Office sawa
ISBN 978-5-94120-267-6 (Додэка) © Перевод, Издательский дом «Додэка-XXI», 2013
ISBN 978-5-97060-117-4 (ДМК Пресс) © Оформление, издание, ДМК Пресс, 2015

ПРЕДИСЛОВИЕ

На многих технических кафедрах – машиностроительных, инженерно-строительных, архитектурных, химико-технологических, – механика, как часть физики, является обязательным предметом. Особую сложность представляет гидродинамика (механика текучих сред), так как в ней присутствует очень много формул, и, вдобавок ко всему, объектом изучения является движение газов и жидкостей, которое нельзя увидеть непосредственно глазом. В связи с этим, гидродинамика имеет репутацию «очень сложной дисциплины», которую многие недолюбливают.

Я уже 8 лет преподаю механику текучих сред в университете, и каждый год встречаю много студентов, которые совершенно не в состоянии её понять. Такие студенты, упустив шанс понять эту дисциплину, в конце концов совершенно разочаровывались в ней. У меня создаётся впечатление, что подобная тенденция усиливается с каждым годом. Мне кажется, что если бы существовало побольше учебных материалов и книг, которые давали бы шанс понять гидродинамику, то можно было бы преодолеть это отрицательное явление.

Цель данной книги – объяснить гидродинамику студентам, потерявшим «шанс к пониманию», а также людям, которые услышали о ней впервые. Мне кажется, что ещё не так давно многие имели предубеждение по поводу использования манги для изучения научных дисциплин. Однако в настоящее время манга уже прочно вошла в японскую культуру, заняв прочную позицию как одно из выразительных средств. И если это новое выразительное средство поможет вашей учёбе, дав шанс к пониманию этой дисциплины, то можно будет сказать, что эта книга в полной мере достигла своей цели. Читайте эту книгу непринуждённо, и она станет для вас проводником в мир механики текучих сред.

В заключение я должен отметить ту огромную поддержку, которую мне оказали г-н Чжао Тонг из Лаборатории Такэи Кафедры машиностроения Технического факультета университета Нихон, сотрудники компании Office Sawa, отвечавшие за оформление, г-жа Мацусита Май – художница манги, а также сотрудники издательства Ohmsha, давшие мне возможность взяться за перо. Выражаю им всем свою огромную признательность.

Такэи Масахиро
октябрь 2009

СОДЕРЖАНИЕ

Пролог.

ЧТО ЭТО - ВЕЩИЙ СОН?! ОККУЛЬТНАЯ ДЕВЧОНКА И МЕХАНИКА ТЕКУЧИХ СРЕД.....	1
---	----------

Глава 1.

СВОЙСТВА И СТАТИКА ТЕКУЧИХ СРЕД	11
--	-----------

1. Твёрдые тела и текучие среды	12
Извольте, чай со льдом.....	12
2. Сила и давление	17
Готовим в скороварке	17
Осваиваем уравнение равновесия сил	23
3. Плотность и относительная плотность	25
Закон Паскаля.....	25
4. Секрет густой лапши «рамэн»	28
Я что, супермен?!.....	28
5. Зависимость давления от высоты и измерение давления.....	31
Отвези меня на дайвинг с аквалангом	31
О смысле знака Δ , который используется в обозначении Δp	35
Скорость и ускорение.....	36
Жидкостный манометр.....	37
6. Полное давление, действующее на плоскую стенку.....	39
Очарованные в океанариуме.....	39
7. Сила плавучести	42
Почему корабли не тонут?.....	42

Глава 2.

ОСНОВНЫЕ УРАВНЕНИЯ ТЕЧЕНИЯ.....	49
--	-----------

1. Разнообразные термины, используемые в механике текучих сред ...	50
Пожалуйста, не изменяйся (Стационарное и нестационарное течения).....	52
Скорость и направление (Однородное и неоднородное течения).....	53

Привет, я - частица текучей среды!	
(Скорость текучей среды и расход текучей среды).....	55
Преследовать? Или поджидать? (метод Лагранжа и метод Эйлера).....	56
И такая линия, и вот такая линия	
(Линии тока, траектории и трубки тока)	58
Что можно понять, играя с водой	
(Силы, действующие на текучую среду)	60
Попробуем сдвинуть колоду карт (сдвигающая сила).....	63
2. Уравнение неразрывности	66
Похищения призраками не происходит?! (Закон сохранения массы).....	66
Об уравнении неразрывности	70
3. Теорема Бернулли	71
Покатаемся на американских горках! (Закон сохранения энергии тела)	71
Прогуливаемся вдоль линий тока.	
(Закон сохранения энергии текучей среды, теорема Бернулли).....	72
О единицах измерения энергии.....	75
Наступаем на шланг!	
(Отношения между скоростью текучей среды и давлением)	76
4. Закон сохранения импульса	80
Поиграем с колыбелью Ньютона (Закон сохранения импульса).....	80
Закон сохранения импульса для колыбели Ньютона.....	81
Приложим силу извне (Импульс силы).....	83
В потайной комнате. (Закон сохранения импульса текучей среды)	86

Глава 3.

ЛАМИНАРНОЕ И ТУРБУЛЕНТНОЕ ТЕЧЕНИЕ 95

1. Течение, обладающее вязкостью	96
Густо? Или жидко? (Вязкость)	98
Вредина, мешающая течению (Сила вязкости)	99
То ускоряет, то замедляет (Механизм действия силы вязкости).....	100
Что это - призрак? (Идеально текучая среда и вязкая текучая среда).....	104
Что такое градиент скорости? (Закон вязкости Ньютона)	106
Насколько это густо? (Коэффициент вязкости	
и коэффициент кинематической вязкости)	110
Великий закон, выражающий свойства течения? (Число Рейнольдса)....	111
2. Ламинарное течение и турбулентное течение	113
Ой, оно пришло в беспорядок (Свойства турбулентного течения).....	113
Наблюдаем за дымом (Ламинарное течение и турбулентное течение)	115
Льём чернила (Опыт Рейнольдса).....	116

3. Ламинарное течение внутри трубы	117
Течение внутри соломинки (Средняя скорость текучей среды и распределение скоростей текучей среды).....	117
Поглядим пристально на формулу! (Течение с параболическим распределением).....	120
Какова природа таинственной силы? (Разность давлений).....	122
Хочу выпить побольше! (Связь между коэффициентом вязкости и расходом текучей среды).....	126
Можно ли выпить молочный коктейль без проблем? (Расширенное уравнение Бернулли).....	128
Потери давления в изогнутых трубах.....	134
Вода, оставшаяся в ванне, и нефть Аравийского моря?!.....	138

Глава 4.

ЛОБОВОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ И ПОДЪЁМНАЯ СИЛА... 139

1. Лобовое сопротивление и подъёмная сила, действующие на тело ...	140
Почему птицы и самолёты могут летать по небу? (Подъёмная сила).....	143
Почему яхта движется против ветра (Использование подъёмной силы).....	146
Что общего между крылом и парусом (Теорема о кривизне линий тока).....	149
Чудеса с ложкой?! (Опыт с подъёмной силой)	153
Я устала плавать (Лобовое сопротивление).....	155
Трудная дилемма! (Коэффициент лобового сопротивления и коэффициент подъёмной силы).....	157
Потеря скорости?! (Угол атаки, отрыв)	161
2. Силы, действующие на вращающееся тело	163
Почему поворачивает кручёный мяч? (Эффект Магнуса).....	163
Искрапленное лучше, чем гладкое? (Снижение сопротивления воздуха).....	167
И тогда мяч повернул	172
3. Отрыв течения	172
Страшное событие в маленьком мирке?! (Отрыв)	174

ЭПИЛОГ	182
---------------------	------------

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	193
--------------------------------	------------

ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ	194
-----------------------------------	------------

Пролог

ЧТО ЭТО - ВЕЩИЦА СОН?! ОККУЛЬТНАЯ ДЕВЧОНКА И МЕХАНИКА ТЕКУЧИХ СРЕД







БАБАХ



БЫЛО ТАК СТРАШНО!
УТОНУЛ КОРАБЛЬ!
УПАЛ САМОЛЁТ!
МОЖЕТ БЫТЬ,
ЛУЧШЕ СООБЩИТЬ
НА ТЕЛЕВИДЕНИЕ?! ИНАЧЕ
НЕСЧАСТЬЯ НЕ ИЗБЕЖАТЬ!

НЕСЧАСТЬЕ
У ТЕБЯ
С ГОЛОВОЙ...

ААА!

ААА!

ПОМНИШЬ, КАК ТЫ ШУМЕЛА
В ПРОШЛЫЙ РАЗ? НО ВЕДЬ
ВСЁ ОБОШЛОСЬ...



ММ... НО ЭТОТ СОН
НИКАК НЕ ВЫХОДИТ
У МЕНЯ ИЗ ГОЛОВЫ.

МЕНЯ СТАЛО БЕСПОКОИТЬ: А ВООБЩЕ,
ПОЧЕМУ САМОЛЁТЫ ЛЕТАЮТ?
И ПОЧЕМУ КОРАБЛИ НЕ ТОНУТ?



ТЯЖЁЛЫЕ КУСКИ
ЖЕЛЕЗА МОГУТ
ПЛАВАТЬ И ЛЕТАТЬ
- РАЗВЕ ЭТО
НЕ ЧУДО!

КАК ОНИ
ПЛАВАЮТ
И ЛЕТАЮТ?!

ШВЫРЬ...

ТЫ ЧТО, ЕЩЁ
НЕ ЗАКОНЧИЛА
МЛАДШУЮ
ШКОЛУ?



ТОГДА ТЫ, АКАНЭ,
ОБЪЯСНИ МНЕ ЭТО...

НУ, РАЗ
ТЫ ПРОСИШЬ
МЕНЯ
ОБЪЯСНИТЬ...

ТОП
ТОП



ТУСК

ДА.

ВОЗДУХ - ЭТО ГАЗ,
А ВОДА - ЭТО ЖИДКОСТЬ.



ГАЗЫ И ЖИДКОСТИ
ИМЕЮТ ОБЩЕЕ
НАЗВАНИЕ - ...

...ТЕКУЩИЕ СРЕДЫ!

ДЕЙСТВИТЕЛЬНО,
ОНИ ПОВСЮДУ
ВОКРУГ НАС.

Текущие
среды

ТЕКУЩИЕ СРЕДЫ -
ЭТО ВЕДЬ СОВСЕМ
НЕ СЛОЖНО,
ПРАВДА?

ИМЕННО
ТАК.

ВОЗДУХ ТЕЧЁТ,
СОЗДАВАЯ
ВЕТЕР.

ВОДА ТОЖЕ
СВОБОДНО
ТЕЧЁТ.

ДА,
ДА.

ДРУГИМИ
СЛОВАМИ...

...ТЕКУЧЕ СРЕДЫ
СВОБОДНО МЕНЯЮТ
ФОРМУ,...

...А ИЗМЕНЕНИЕ
ЭТИХ ТЕЧЕНИЙ,
ИХ ДЕЙСТВИЕ...

...ПОЗВОЛЯЕТ
ПОНЯТЬ НАУКА
ПОД НАЗВАНИЕМ...

ФЮИТЬ

...МЕХАНИКА
ТЕКУЧИХ СРЕД
ИЛИ ГИДРОДИНАМИКА.

ДА, ТЕКУЧЕ СРЕДЫ
ДЕЙСТВИТЕЛЬНО
ПОВСЮДУ ВОКРУГ НАС.

ОДНАКО НУЖНО
ЛИ НАМ ЗНАТЬ, КАК
ОНИ ТЕКУТ?

ДА,
ОЧЕНЬ!

ВЕДЬ КОМФОРТ
СОВРЕМЕННОГО
ОБЩЕСТВА - ВО МНОГОМ
БЛАГОДАРЯ ЭТОЙ НАУКЕ.

ОНА СВЯЗАНА И С ПРОЦЕССОМ
ВЫРАБОТКИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ,...

И С УСТРОЙСТВОМ
НАСОСОВ, ПОДАЮЩИХ
ВОДУ И ГАЗ В ДОМА
И НА ЗАВОДЫ.

ОГО

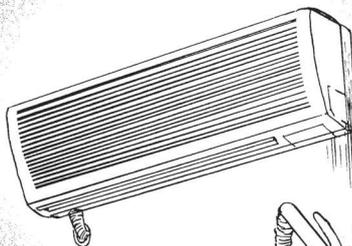


А ЕЩЁ, НАПРИ-
МЕР, СО СПОРТОМ,
С БЫТОВОЙ
ЭЛЕКТРОТЕХНИКОЙ.

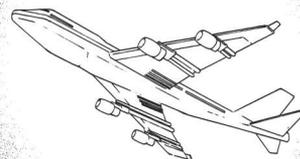
ПОЛЁТ МЯЧА
В РАЗЛИЧНЫХ
ВИДАХ
СПОРТА.



ИСПОЛЬЗУЮЩАЯ
ВОДУ
СТИРАЛЬНАЯ
МАШИНА.



ПОДАЮЩИЙ
ВОЗДУХ
КОНДИЦИОНЕР.



И, КОНЕЧНО,
КОРАБЛИ,
САМОЛЁТЫ,
АВТОМОБИЛИ
И ДРУГИЕ
ТРАНСПОРТНЫЕ
СРЕДСТВА!

КЁРВЕБОЛ,
СЛАЙДЕР,
НАКЛЕБОЛ...*



* Это термины бейсбола (прим. перев.)

ЕЁ ИСПОЛЬЗУЮТ ДЛЯ АТМО-
СФЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ,
РАЗМЫШЛЯЯ О БУДУЩЕМ ЗЕМЛИ
В СВЯЗИ С ГЛОБАЛЬНЫМ
ПОТЕПЛЕНИЕМ,
ДЛЯ КРОВООБРАЩЕНИЯ
ВНУТРИ ИСКУССТВЕННОГО
СЕРЦА.



ВНУТРИ
СЕРЦА!

ПОИСТИНЕ, ОНА СВЯЗАНА
И С ПОВСЕДНЕВНОСТЬЮ,
И С ЯВЛЕНИЯМИ
МАСШТАБА ВСЕЙ
ЗЕМЛИ. КАК ШИРОКА
ЭТА НАУКА!



ДА, ИН-
ТРИГУЮЩЕЕ
ВСТУПЛЕНИЕ.



ТЕПЕРЬ ВЕРНЁМСЯ
К ВОПРОСУ ЭКИ-САН
О ТОМ,...

...ПОЧЕМУ САМОЛЁТЫ ЛЕТАЮТ
И ПОЧЕМУ КОРАБЛИ НЕ ТОНУТ.
МЕХАНИКА ТЕКУЧИХ
СРЕД ДАЁТ ОТВЕТ
НА ЭТИ НАИВНЫЕ
ВОПРОСЫ!



ДА, ЭТО
ГРАНИЦОЗНАЯ
ШТУКОВИНА.

МОЖЕТ БЫТЬ, С ЕЁ
ПОМОЩЬЮ МОЖНО
РАЗГАДАТЬ ТАЙНЫ
РАЗЛИЧНЫХ ЧУДЕС ?!

ЗАОРОВО!
Я ХОЧУ ЕЁ ИЗУЧИТЬ!
ПРОДОЛЖАЙ, СИРАИСИ!!

**ТУДУХ,
ТУДУХ**

**ТУДУХ,
ТУДУХ**

ЛАДНО, ЕСЛИ
ВЫ МНЕ
ДОВЕРЯЕТЕ...

НО ПРЕДУПРЕЖДАЮ
ЗАРАНЕЕ - ЭТОТ РАЗ-
ГОВОР ПОТРЕБУЕТ
ВРЕМЕНИ.

АКАНЭ, ТЫ, КАК
СТАРОСТА КРУЖКА,
НЕ ВОЗРАЖАЕШЬ?

УРА

ЛАДНО. МНЕ ВЕДЬ ТОЖЕ
СТАЛО ИНТЕРЕСНО.

ДАВАЙ,
СИРАИСИ.

ХОРОШО!

УРА! ЦТАК,
РАЗГАДЫВАЕМ
МИСТИЧЕСКИЕ ТАЙНЫ
С ПОМОЩЬЮ
МЕХАНИКИ.

ЧТО, РАЗГАДЫВАЕМ
ТАЙНЫ?! ЭТО ВЗАОР!

И ВООБЩЕ, НИКАКАЯ
НИКАКАЯ У НАС
НЕ ОККУЛЬТНАЯ
ЛАБОРАТОРИЯ...

Оккультная
лаборатория

АХ!

АКАНЭ...

ТРИ

ПРОЛОГ. ЧТО ЭТО - ВЕЩИЙ СОН?! ОККУЛЬТНАЯ ДЕВЧОНКА И МЕХАНИКА ТЕКУЧИХ СРЕД



Физическая лаборатория

НАШ КРУЖОК
НАЗЫВАЕТСЯ....

...ФИЗИЧЕСКАЯ
ЛАБОРАТОРИЯ!



ААА!
Я СТАРАЛАСЬ,
КЛЕИЛА!

СКОЛЬКО НЕ КЛЕЙ,
ВСЁ РАВНО СОРВУ!
ПОТОМУ ЧТО МЫ
НЕ ЗАНИМАЕМСЯ
ОККУЛЬТИЗМОМ!

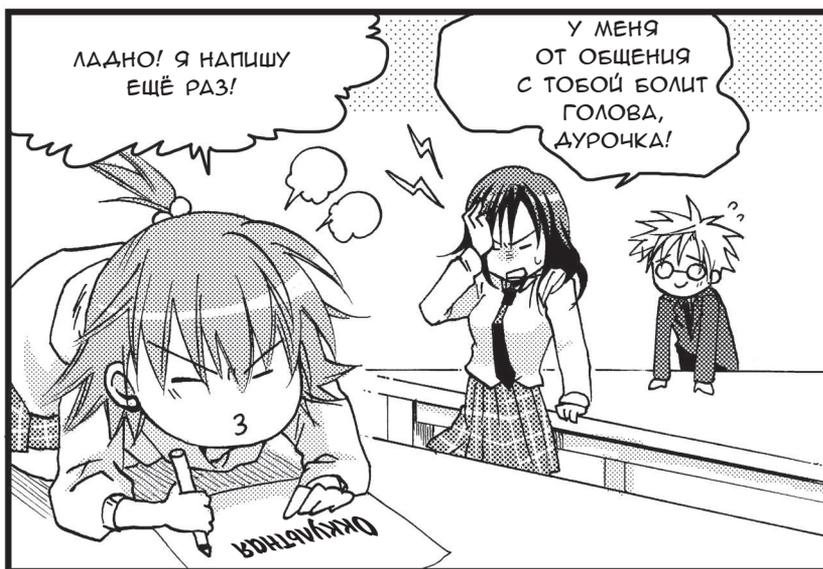
МММ...
НО ВЕДЬ, НО ВЕДЬ...



ААА

...ВЕДЬ В ФИЗИКЕ ТОЖЕ ЧАСТО
РАЗМЫШЛЯЮТ О ТОМ, ЧТО НЕЛЬЗЯ
УВИДЕТЬ ГЛАЗАМИ!

ПОЭТОМУ МНЕ КАЖЕТСЯ, ЧТО
ОККУЛЬТИЗМ - ЭТО ЗВУЧИТ
ВЕСЕЛЕЕ И ЭКСТРАВАГАНТЕЕ!



ЛАДАНО! Я НАПИШУ
ЕЩЁ РАЗ!

У МЕНЯ
ОТ ОБЩЕНИЯ
С ТОБОЙ БОЛИТ
ГОЛОВА,
ДУРОЧКА!

3

Оккультная



И ВОВСЕ
Я НЕ ДУРОЧКА.
ПРОСТО Я ОЧЕНЬ
ЛЮБЛЮ ЧУДЕСА.

ЭТО ВСЕГО ЛИШЬ
ТВОЁ ХОББИ...
И ПРЕКРАТИ
ЗАХЛАМЛЯТЬ
ПОМЕЩЕНИЕ ВСЯКИМИ
НЕПОНЯТНЫМИ
ВЕЩИЧКАМИ!

ММ...
НО ВЕДЬ,
НО ВЕДЬ...

...МОЖЕТ БЫТЬ, ЭТО
ПРИГОДИТСЯ НАМ
В ТРУДНУЮ МИНУТУ!

АХ, ПОСКОРЕЕ БЫ
ТАКАЯ МИНУТА
НАСТУПИЛА...

ГМ... ИТАК, ДАВАЙТЕ
СОБЕРЁМСЯ С СИЛАМИ...

...И ВМЕСТЕ ДРУЖНО
НАЧНЁМ ИЗУЧАТЬ
МЕХАНИКУ ТЕКУЧИХ СРЕД!

ДАВАЙ!

ВПЕРЁД! ОВЛАДЕЕМ ОККУЛЬТ..., ТО ЕСТЬ МЕХАНИКОЙ ТЕКУЧИХ СРЕД!

Глава 1

СВОЙСТВА И СТАТИКА ТЕКУЧИХ СРЕД



1. ТВЁРДЫЕ ТЕЛА И ТЕКУЧИЕ СРЕДЫ

☾ Извольте, чай со льдом

Кухня

ОГО!

МЫ ЧТО, БУДЕМ ИЗУЧАТЬ
МЕХАНИКУ ТЕКУЧИХ СРЕД
ЗДЕСЬ?!

КАК ГОВОРЯТ,
ПРАКТИКА - ПУТЬ
К СОВЕРШЕНСТВУ.

К СЧАСТЬЮ, НАМ
РАЗРЕШИЛИ ЗДЕСЬ
ЗАНИМАТЬСЯ.

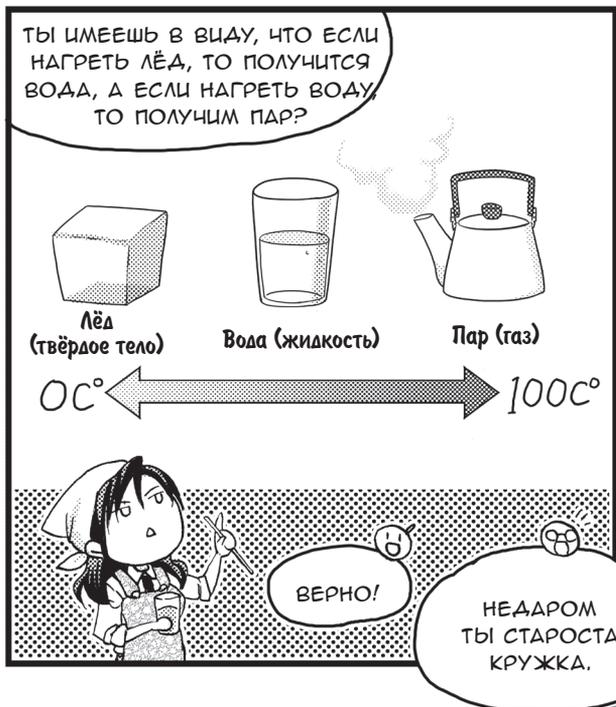
МЫ ОЧЕНЬ УДИВИЛИСЬ, КОГДА
УВИДЕЛИ ТВОЮ ЗАПИСКУ
В КЛАССЕ.

Жду вас
на кухне!

КАК ЗДЕСЬ
ХОРОШО!

ХА-ХА. ИЗВИНИТЕ
ЗА НЕОЖИДАННОЕ
ПРИГЛАШЕНИЕ.

ИТАК,
ПРИСТУПИМ.

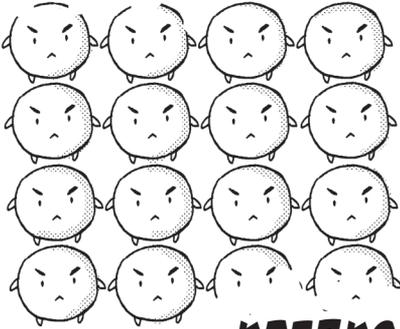


ИТАК, ДАВАЙТЕ РАССМОТРИМ
ОСОБЕННОСТИ ТВЁРДЫХ ТЕЛ,
ЖИДКОСТЕЙ И ГАЗОВ
НА МОЛЕКУЛЯРНОМ УРОВНЕ.



Твёрдые тела

ПЛОТНО



КРЕПКО!

МОЛЕКУЛЫ ЛЬДА -
ТВЁРДОГО ТЕЛА, КРЕПКО
ДЕРЖАТСЯ ДРУГ ЗА ДРУГА
И НЕ ДВИГАЮТСЯ
ПРИ ДЕЙСТВИИ
НЕБОЛЬШИХ СИЛ.

ОГО! КАКАЯ
ДРУЖНАЯ
КОМАНДА!



ДА, ЗАВИДНАЯ
ДИСЦИПЛИНА.

Жидкости

СВОБОДНО



НЕСПЕШНОЕ ДВИЖЕНИЕ

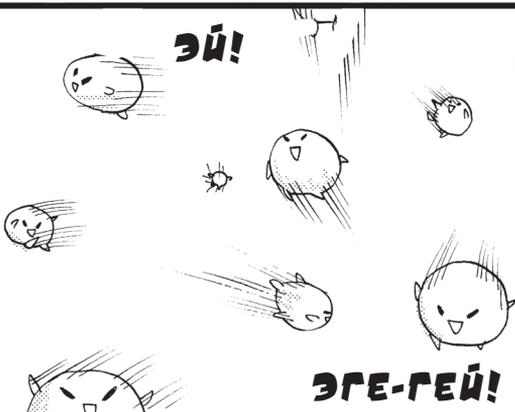
МОЛЕКУЛЫ ЖИДКОСТЕЙ
ХОТЬ И НЕТОРОПЛИВЫ,
НО НА МЕСТЕ НЕ СТОЯТ.

МОЛЕКУЛЫ ТО ПРИТЯГИВАЮТСЯ
ДРУГ К ДРУГУ, ТО ОТТАЛКИВАЮТСЯ.
ДА, ЗАЭСЬ ЦАРИТ ОЖИВЛЁННАЯ
АТМОСФЕРА.



Газы

ЭЙ!



ЭГЕ-ГЕЙ!

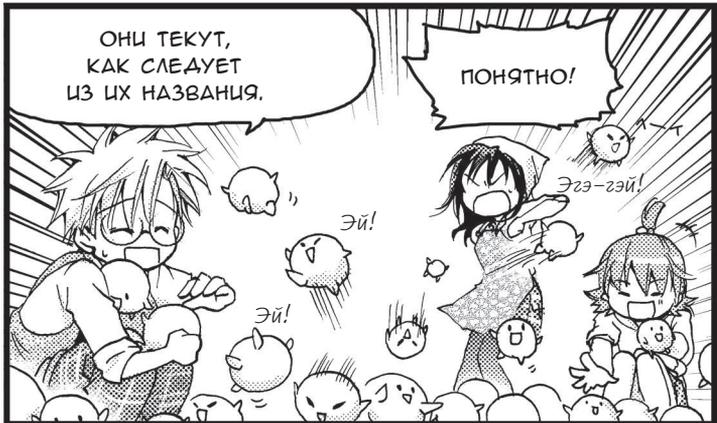
МОЛЕКУЛЫ ГАЗОВ ОЧЕНЬ
СВОЕВОЛЬНЫ И СВОБОДНО
ДВИЖУТСЯ ПОВСЮДУ!

НЕУГОМОННЫЕ,
ПРЯМО КАК
КОЕ-КТО...



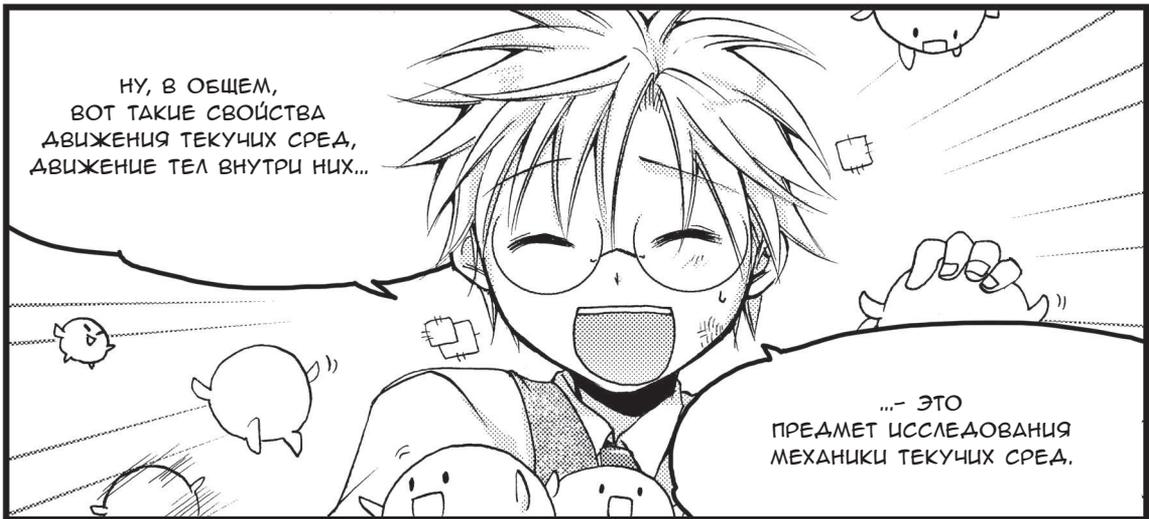


ЖИДКОСТИ И ГАЗЫ, ТО ЕСТЬ
ТЕКУЧЕ СРЕДЫ, ДВИЖУТСЯ
И МОГУТ МЕНЯТЬ ФОРМУ.



ОНИ ТЕКУТ,
КАК СЛЕДУЕТ
ИЗ ИХ НАЗВАНИЯ.

ПОНЯТНО!



НУ, В ОБЩЕМ,
ВОТ ТАКИЕ СВОЙСТВА
ДВИЖЕНИЯ ТЕКУЧИХ СРЕД,
ДВИЖЕНИЕ ТЕЛ ВНУТРИ НИХ...

...- ЭТО
ПРЕДМЕТ ИССЛЕДОВАНИЯ
МЕХАНИКИ ТЕКУЧИХ СРЕД.



УГУ. В ЦЕЛОМ
ПОНЯТНО.

ЭТО
Я КОЕ-КАК
ПОНЯЛА.



НО СКАЖИ, СИРАУСИ, КАК
ВСЁ ЭТО ПРИВЕДЕТ НАС
К ОККУЛЬТИЗМУ?!

СКОРЕЙ НАУЧИ МЕНЯ
МЕХАНИКЕ
ТЕКУЧИХ СРЕД! Я ХОЧУ
РАЗГАДАТЬ ТАЙНЫ ЧУДЕС!

ПОЖАЛУЙСТА,
НЕ НАДО
ТАК СПЕШИТЬ!

БУХ



НА САМОМ ДЕЛЕ,
В ОСНОВЕ МЕХАНИКИ
ТЕКУЧИХ СРЕД ЛЕЖИТ
КЛАССИЧЕСКАЯ
МЕХАНИКА, КОТОРУЮ
ПРЕПОДАЮТ В ШКОЛЕ
НА УРОКАХ ФИЗИКИ.

ПОЭТОМУ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ
МЕХАНИКИ ТЕКУЩИХ
СРЕД...

...НУЖНЫ
БАЗОВЫЕ ЗНАНИЯ
ПО КЛАССИЧЕСКОЙ
МЕХАНИКЕ!

ЧТО?! Я ЖЕ В ЭТОМ
НИЧЕГО НЕ ПОНИМАЮ!

ЧТО ЖЕ
ДЕЛАТЬ!

И ЭТО ГОВОРIT
ЧЛЕН ФИЗИЧЕСКОГО
КРУЖКА!

НЕ ВОЛНУЙСЯ,
ЭКИ-САН.

Я СЕГОДНЯ
РАССКАЖУ
ПРО САМЫЕ ДЗЫ -
ПРО ФОРМУЛЫ И
ЕДИНИЦЫ ИЗМЕРЕНИЯ.

УРА!

ПРАВДА?!

СПАСИБО,
СИРАЦИ!

ГР

АХ!

Я ПРОГОЛОДАЛАСЬ
ОТ ВСЕХ ЭТИХ
ВОЛНЕНИЙ.

Надень же,
наконец,
фартук!

ТОГДА ДАВАЙ
ГОТОВИТЬ.

СЕГОДНЯ МЫ
СДЕЛАЕМ ЛАПШУ
"РАМЭН".

ЭТО БУДЕТ НАСТОЯЩИЙ РАМЭН,

СО СВИНЫМ ФИЛЕ!

ТАДАМ

КАК?! ПРЯМО
СЕЙЧАС?!

2. СИЛА И ДАВЛЕНИЕ



🍷 ГОТОВИМ В СКОРОВАРКЕ

СВИНОЕ ФИЛЕ МЫ
БУДЕМ ГОТОВИТЬ
В ЭТОЙ СКОРОВАРКЕ.

ЭТО СОКРАТИТ ВРЕМЯ
ВАРКИ В 3 РАЗА.



КАК БЫСТРО!
МОЖЕТ БЫТЬ,
ЭТО ЧЁРНАЯ
МАГИЯ?

КАК ТЫ
ДУМАЕШЬ,
АКАНЭ?

МОГУ СКАЗАТЬ
ТОЛЬКО ОДНО -
ЭТО НЕ ТАК.

СТУК, СТУК

ШУРХ

ШУРХ



ВОТ, ТЕПЕРЬ
ОСТАЛОСЬ ТОЛЬКО
СВАРИТЬ.

КАК БЫСТРО!

СКОРОСТЬ СКОРОВАРКИ
ДОСТИГАЕТСЯ БЛАГОДАРЯ
ДАВЛЕНИЮ.



АТМОСФЕРНОЕ
ДАВЛЕНИЕ, ОБЫЧНО
ДЕЙСТВУЮЩЕЕ
НА НАС, РАВНО
1 АТМОСФЕРЕ.

ОДНАКО ДАВЛЕНИЕ
В НАГРЕТОЙ СКОРОВАРКЕ,
БЛАГОДАРЯ ПЛотно
ЗАКРЫТОЙ КРЫШКЕ,
СОСТАВЛЯЕТ
2 АТМОСФЕРЫ.

Крышка позволяет исключить
влияние атмосферного давления!



Свиное
филе



ИЗВЕСТНО, ЧТО ПРИ
ДАВЛЕНИИ В 2 АТМО-
СФЕРЫ ТОЧКА КИПЕНИЯ
ВОДЫ БУДЕТ НЕ 100°C,
А ЦЕЛЫХ 120°C.

БЛАГОДАРЯ
БОЛЕЕ ВЫСОКОЙ
ТЕМПЕРАТУРЕ ВРЕ-
МЯ ВАРКИ ТОЖЕ
СОКРАЩАЕТСЯ.

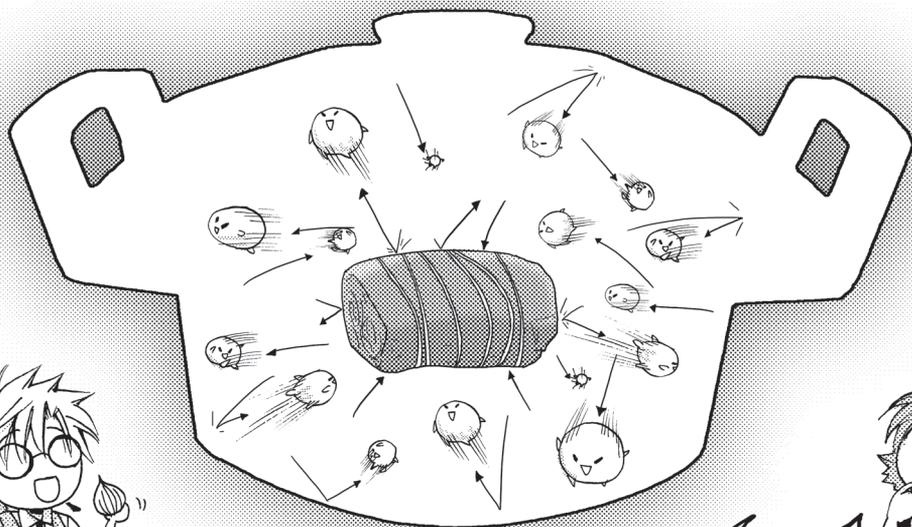
Правда?



ЗНАЧИТ, ТАМ ВНУТРИ - ДАВЛЕНИЕ 2 АТМОСФЕРЫ. ТО ЕСТЬ ТАМ ПРОСТО ИНОЙ МИР!

Иной мир?

НАВЕРНОЕ, ИНТЕРЕСНО БУДЕТ ПОПЫТАТЬСЯ ПРЕДСТАВИТЬ СЕБЕ ПРОИСХОДЯЩЕЕ ВНУТРИ.

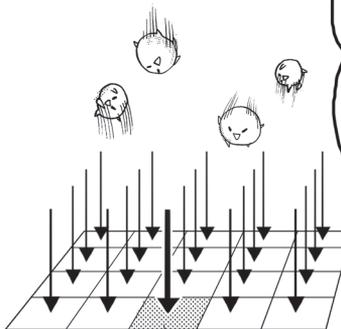


ВНУТРИ СКОРОВАРКИ МОЛЕКУЛЫ ТЕКУЧЕЙ СРЕДЫ (ГАЗА ИЛИ ЖИДКОСТИ) ПОСТОЯННО СТАЛКИВАЮТСЯ ДРУГ С ДРУГОМ И С ВНУТРЕННЕЙ СТЕНКОЙ, СОЗДАВАЯ ДАВЛЕНИЕ.

ДА, НАСТОЯЩЕЕ БУЙСТВО РАЗЫГРАЛОСЬ.

НАВЕРНОЕ, СВИНОМУ ФИЛЕ ТОЖЕ НЕ ОЧЕНЬ ПРИЯТНО.

В ПОВСЕДНЕВНОЙ ЖИЗНИ МЫ ТОЖЕ ЧАСТО ИСПОЛЬЗУЕМ СЛОВО ДАВЛЕНИЕ, НО ДАВЛЕНИЕ В МЕХАНИКЕ - ЭТО ПЕРПЕНДИКУЛЯРНО НАПРАВЛЕННАЯ СИЛА, ДЕЙСТВУЮЩАЯ НА ЕДИНИЧНУЮ ПЛОЩАДЬ ПОВЕРХНОСТИ.



Едини́чная пло́щадь

ПЕРПЕНДИКУЛЯРНО СВЕРХУ. БЕДНАЯ ПОВЕРХНОСТЬ.

ЭКИ! ТЫ ОПЯТЬ ВСЁ РАЗБРОСАЛА.

ПРОШУ ПРОЩЕНИЯ!

НА МЕНЯ ДОМА ТОЖЕ ОКАЗЫВАЕТСЯ ДАВЛЕНИЕ.

ШМЫГ

$$p = \frac{F}{A}$$

НАПРИМЕР,
ЕСЛИ НА ПЛОЩАДЬ A [м²]
ДЕЙСТВУЕТ СИЛА
 F [Н] (НЬЮТОНОВ),
ТО ДАВЛЕНИЕ p НАХОДЯТ
ВОТ ПО ЭТОЙ ФОРМУЛЕ.

ЕДИНИЦА ИЗМЕРЕНИЯ
ДАВЛЕНИЯ - ЭТО
ПА (ПАСКАЛЬ).

ЗНАЧИТ,
ЕСЛИ НА ПЛОЩАДЬ 1 м² (ПЛОЩАДЬ
КВАДРАТА С ДЛИНОЙ СТОРОНЫ 1 М)
ДЕЙСТВУЕТ СИЛА 1 Н (СИЛА ТЯЖЕСТИ,
ДЕЙСТВУЮЩАЯ НА ТЕЛО МАССОЙ ОКОЛО
102 Г), ТО ДАВЛЕНИЕ БУДЕТ РАВНО 1 ПА.

В СЛОВЕСНОЙ ФОРМЕ
ЭТО МОЖНО ЗАПИСАТЬ
ВОТ ТАК!

ого!

$$p \text{ (Давление)} = \frac{F \text{ (Сила)}}{A \text{ (Площадь)}}$$

ВОТ ПОЧЕМУ ЕДИНИЦУ ИЗМЕРЕНИЯ
ПА (ПАСКАЛЬ) МОЖНО ЗАПИСАТЬ
ТАКЖЕ КАК Н/М² (НЬЮТОН
НА КВАДРАТНЫЙ МЕТР), ПОНЯТНО?

$$\text{Давление [Па]} = \frac{\text{Сила [Н]}}{\text{Площадь [м}^2\text{]}}$$

ТОЧНО!
ПОЛУЧАЕТСЯ,
ЧТО 1 ПА = 1 Н/М².

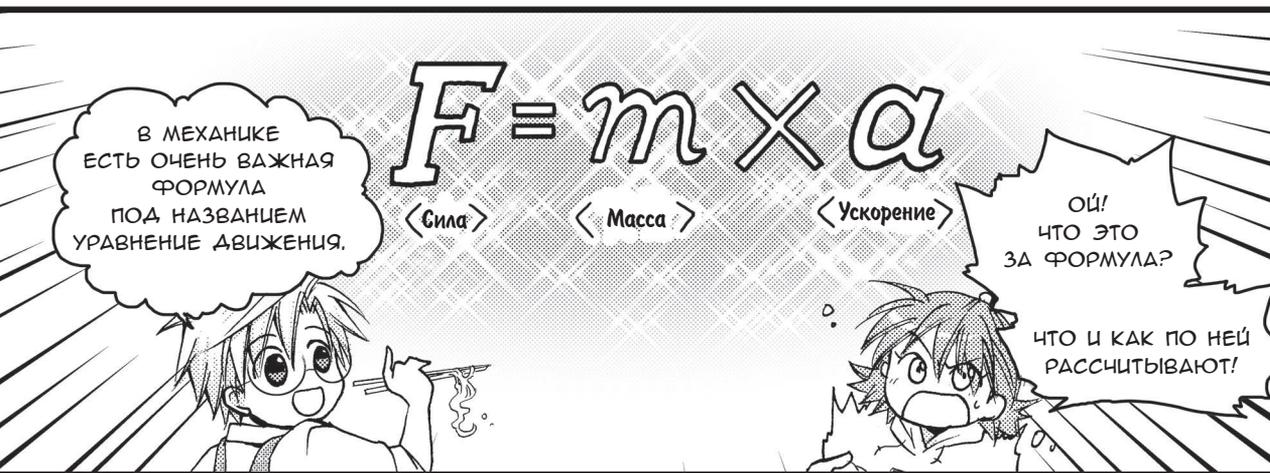
ТЕПЕРЬ, УМНОЖИВ ДАВЛЕНИЕ p
НА ПЛОЩАДЬ A , МЫ ПОЛУЧИМ
ПОЛНОЕ ДАВЛЕНИЕ P . ЕГО ЕДИНИЦЕЙ
ИЗМЕРЕНИЯ БУДЕТ
Н (НЬЮТОН).

Ого

КАК ВКУСНО
ПАХНЕТ.

ЭКИ-САН, СНИМИ
СКОРОВАРКУ,
ПОЖАЛУЙСТА.

ХОРОШО.





ДАВАЙ ПОПРОБУЕМ ПОДАСТАВИТЬ ЭТО В ФОРМУЛУ.
 ВЫРАЗИМ СИЛУ F , КОТОРАЯ ДЕЙСТВУЕТ НА СКОРОВАРКУ МАССОЙ m , ЧЕРЕЗ УСКОРЕНИЕ СВОБОДНОГО ПАДЕНИЯ g .

m = Масса сковородки
 g = Ускорение свободного падения

F = Масса сковородки
 ×
 Ускорение свободного падения

АГА!
 $F = mg$, ПРАВИЛЬНО?

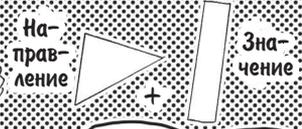
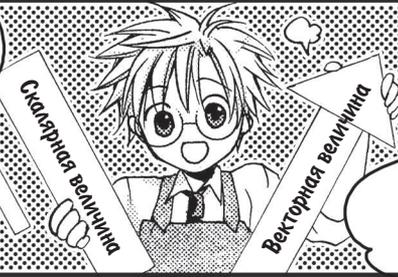
ЗНАЧИТ, ЭТО СИЛА, КОТОРАЯ ДЕЙСТВУЕТ НА МОИ РУКИ?!

УСКОРЕНИЕ a , УСКОРЕНИЕ СВОБОДНОГО ПАДЕНИЯ g ОЧЕНЬ ЧАСТО ФИГУРИРУЮТ В РАЗЛИЧНЫХ ФОРМУЛАХ.
 КАК ЧЛЕН ФИЗИЧЕСКОГО КРУЖКА, ТЫ ОБЯЗАНА ЭТО УСВОИТЬ.



ММ. ХОРОШО!

КСТАТИ, ВЕЛИЧИНУ, У КОТОРОЙ ЕСТЬ ЗНАЧЕНИЕ И НАПРАВЛЕНИЕ, НАЗЫВАЮТ ВЕКТОРНОЙ ВЕЛИЧИНОЙ.
 НАОБОРОТ, ВЕЛИЧИНА, У КОТОРОЙ ЕСТЬ ТОЛЬКО ЗНАЧЕНИЕ, НАЗЫВАЕТСЯ СКАЛЯРНОЙ ВЕЛИЧИНОЙ.

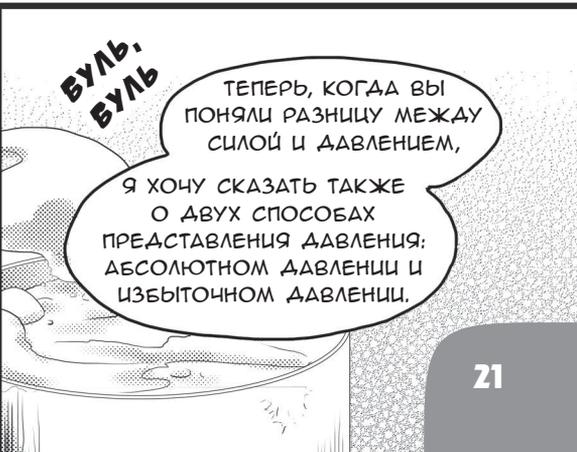


ЗНАЧИТ, F и g - ЭТО ТОЖЕ ВЕКТОРНЫЕ ВЕЛИЧИНЫ?!

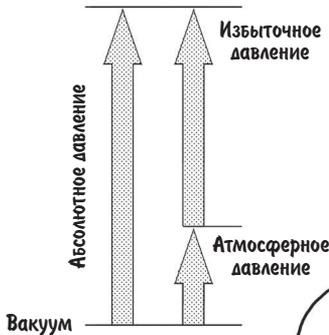
ЗДЕСЬ НЕОБХОДИМО ОБРАТИТЬ ВНИМАНИЕ НА ОБОЗНАЧЕНИЕ ВЕКТОРНЫХ И СКАЛЯРНЫХ ВЕЛИЧИН.
 ВЕКТОРНЫЕ ВЕЛИЧИНЫ ПРИНЯТО ОБОЗНАЧАТЬ ЖИРНЫМИ БУКВАМИ: F , a , g И ТАК ДАЛЕЕ. СКАЛЯРНЫЕ ВЕЛИЧИНЫ ПИШУТ ОБЫЧНЫМИ БУКВАМИ: t , m И ТАК ДАЛЕЕ.



ХОРОШО!
 Я ПОНЯЛА!



БУЛЬ-БУЛЬ
 ТЕПЕРЬ, КОГДА ВЫ ПОНЯЛИ РАЗНИЦУ МЕЖДУ СИЛОЙ И ДАВЛЕНИЕМ, Я ХОЧУ СКАЗАТЬ ТАКЖЕ О ДВУХ СПОСОБАХ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ: АБСОЛЮТНОМ ДАВЛЕНИИ И ИЗБЫТОЧНОМ ДАВЛЕНИИ.



ДЛЯ АБСОЛЮТНОГО ДАВЛЕНИЯ
ЗА ТОЧКУ ОТСЧЁТА О ПА
ПРИНИМАЕТСЯ ВАКУУМ.

ДЛЯ ИЗБЫТОЧНОГО ДАВЛЕНИЯ
ЗА ТОЧКУ ОТСЧЁТА О ПА
ПРИНИМАЕТСЯ АТМОСФЕРНОЕ
ДАВЛЕНИЕ.

ЗНАЧИТ, АБСОЛЮТНОЕ
ДАВЛЕНИЕ - ЭТО СУММА
АТМОСФЕРНОГО
И ИЗБЫТОЧНОГО ДАВЛЕНИЙ.

АТМОСФЕРНОЕ ДАВЛЕНИЕ
МОЖЕТ МЕНЯТЬСЯ В ЗАВИСИ-
МОСТИ ОТ ПОГОДЫ, ПОЭТОМУ
В НЕКОТОРЫХ СЛУЧАЯХ
УДОБНЕЕ ИСПОЛЬЗОВАТЬ
ИЗБЫТОЧНОЕ ДАВЛЕНИЕ.
НАПРИМЕР, ДАВЛЕНИЕ ВОЗДУХА,
НАКАЧИВАЕМОГО В ШИНУ - ЭТО
ИЗБЫТОЧНОЕ ДАВЛЕНИЕ.

ИТАК, ТЕПЕРЬ О ЕДИНИЦАХ
ИЗМЕРЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ!

ДАВЛЕНИЕ СТАНДАРТНОЙ
АТМОСФЕРЫ, ДРУГИМИ СЛОВАМИ,
1 АТМОСФЕРА = 1 АТМ., СООТВЕТСТВУЕТ
АБСОЛЮТНОМУ ДАВЛЕНИЮ 101,3 КПА
(КИЛОПАСКАЛЕЙ).

Оба этих
предмета
являются
столовыми
приборами,
не так ли?

1 АТМОСФЕРА.
101,3 КИЛО-
ПАСКАЛЕЙ

КРОМЕ ТОГО, СУЩЕСТВУЕТ И ТАКАЯ
ЕДИНИЦА ИЗМЕРЕНИЯ, КАК ММ РТ.СТ.
(МИЛЛИМЕТРЫ РТУТНОГО СТОЛБА).

СООТНОШЕНИЕ МЕЖДУ ВСЕМИ НИМИ
СЛЕДУЮЩЕЕ: 1 АТМОСФЕРА = 1 АТМ. =
= 101,3 КПА = 760 ММ РТ.СТ.!

ОХ!
КАК МНОГО ЕДИНИЦ
ИЗМЕРЕНИЯ! СТАНОВИТСЯ ВСЁ
СЛОЖНЕЕ И СЛОЖНЕЕ!

НЕ ПЕРЕЖИВАЙ, ЭКИ-САН!
ПОСТЕПЕННО ТЫ ИХ ВСЕХ
ЗАПОМНИШЬ!

ЛАПША "РАМЭН" УЖЕ
ГОТОВА, ПОКУШАЙ
И ВЗБОДРИСЬ!

УРА!
НАКОНЕЦ-ТО!

ПРИМИТИВНАЯ
НАТУРА.

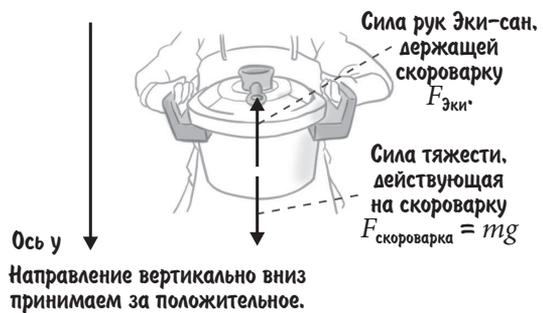


Осваиваем уравнения равновесия сил

Строго говоря, уравнение движения $F = mg$ выполняется только для движущихся тел. Случай Эки-сан, неподвижно державшей сковородку, описывается уравнением равновесия, которое отличается от уравнения движения. Проясним же здесь отличие между этими уравнениями!



■ Рис. А-1. Сила, действующая на падающую сковородку.



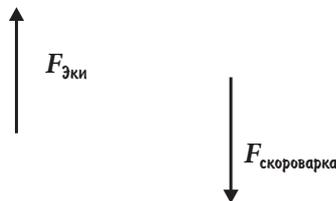
■ Рис. А-2. Силы, действующие на неподвижную сковородку.

Что же будет в случае, показанном на рис. А-1, если Эки-сан вдруг выронит сковородку из рук? Сковородка под действием силы тяжести $F_{\text{сковородка}}$ начнёт падать и через некоторое время ударится об пол. Эта сила тяжести $F_{\text{сковородка}}$ равна mg , а уравнение, описывающее падение сковородки, называется *уравнением движения*. Если мы примем направление вертикально вниз за положительное (плюсовое), то сила тяжести будет направлена в положительном направлении оси y .

Далее, рассмотрим случай, когда сковородка покоится, поддерживаемая силой рук Эки $F_{\text{Эки}}$. Уравнение, описывающее это состояние покоя, называется *уравнением равновесия*. Покажем, как оно составляется.

Порядок составления уравнения равновесия.

(1) Изображаем все силы стрелками на схеме, как на рис. А-2.



(2) Выбираем положительное направление. Здесь выбрано направление вертикально вниз, но можно выбрать и вертикально вверх – это большой роли не играет.



(3) Записываем все силы с учётом знака направления – это будет левая часть нашего уравнения:

$$- F_{\text{Эки}} + F_{\text{скороварка}}$$

(4) Равновесие означает, что в правой части уравнения должен быть 0. Другими словами, все силы уравновешивают друг друга и $\Sigma F = 0$. Знак Σ (сигма) – это математический оператор, означающий сумму всех идущих после него элементов, в данном случае всех F :

$$- F_{\text{Эки}} + F_{\text{скороварка}} = 0.$$

Кстати, для случая *уравнения движения* правая часть в пункте (4) выше будет равна масса (m) \times ускорение (g или a), то есть:

$$\Sigma F = mg.$$

Давайте подумаем ещё раз о силах, действующих на покоящуюся скороварку на рис. А-2. Силу $F_{\text{Эки}}$, которую прикладывает Эки, чтобы удержать скороварку, можно из уравнения пункта (4) выразить следующим образом:

$$- F_{\text{Эки}} + F_{\text{скороварка}} = 0.$$

Следовательно,

$$F_{\text{Эки}} = F_{\text{скороварка}}.$$

Кроме того, согласно уравнению движения, действующая на скороварку сила тяжести $F_{\text{скороварка}} = mg$, а значит:

$$F_{\text{Эки}} = mg.$$

Здесь необходимо обратить внимание на то, что сила $F_{\text{Эки}}$ оказывается равной mg не прямо, а косвенно.

3. ПЛОТНОСТЬ И ОТНОСИТЕЛЬНАЯ ПЛОТНОСТЬ

👉 Секрет густой лапши «рамэн»



ОГО!
КАК ВКУСНО!

И СВИНОЕ ФИЛЕ
ТАКОЕ МЯГКОЕ.



ЭТО ФИЛЕ ХОРОШО
СОЧЕТАЕТСЯ С ГУСТЫМ
СУПОМ, НЕ ТАК ЛИ?

ЭКИ-САН, ЗАДАМ-КА
ТЕБЕ ВОПРОС НАСЧЁТ
СУПА.

ЗНАЕШЬ ЛИ ТЫ, ПОЧЕМУ ЖИР
НА ПОВЕРХНОСТИ
НЕ СМЕШИВАЕТСЯ С СУПОМ?



ГОВОРЯТ, ЧТО ВОДА
И ЖИР НЕ ДРУЖАТ.

МОЖЕТ БЫТЬ,
ЭТО ВЛИЯНИЕ
ПРОШЛЫХ
ЖИЗНЕЙ?



ПРИЧИНА ЗАЕЗЬ
В РАЗНЫХ ПЛОТНОСТЯХ.

ДУРОЧКА!



ПЛОТНОСТЬ - ЭТО МАССА,
ПРИХОДЯЩАЯСЯ НА ЕДИ-
НИЧНЫЙ ОБЪЁМ (1 М³).

РАЗНЫЕ ВЕЩЕСТВА
ОБЛАДАЮТ РАЗНОЙ
ПЛОТНОСТЬЮ, И ВЕЩЕСТВА
С МЕНЬШЕЙ ПЛОТНОСТЬЮ
ВСПЛЫВАЮТ.

ЗНАЧИТ, У ЖИРА
ПЛОТНОСТЬ МЕНЬШЕ,
ЧЕМ У ВОДЫ.



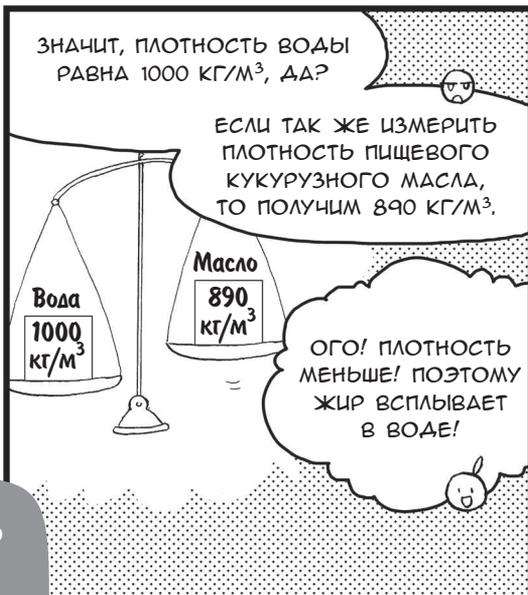
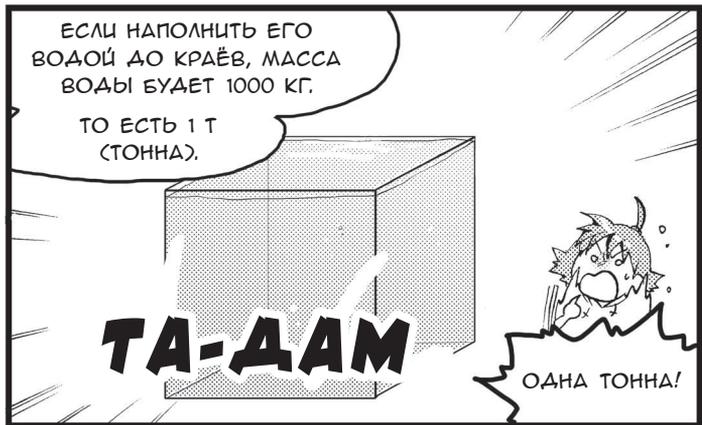
ПЛОТНОСТЬ ρ ТЕЛА МАССОЙ m (КГ) И ОБЪЕМОМ V (М³) ЗАПИСЫВАЕТСЯ ВОТ ТАК.

МОЖНО НАГЛЯДАНЕЕ ЗАПИСАТЬ СЛОВАМИ, ВОТ ТАК.

$$\rho = \frac{m}{V}$$

ЕДИНИЦЕЙ ИЗМЕРЕНИЯ ЯВЛЯЕТСЯ КГ/М³ (ПРОИЗНОСИТСЯ "КИЛОГРАММ НА КУБИЧЕСКИЙ МЕТР").

Плотность = $\frac{\text{Масса [кг]}}{\text{Объём [м}^3\text{]}}$





В механике используют выражение «масса тела», а не «вес»



* При давлении стандартной атмосферы (1 атм = 101,3 кПа) и температуре 20°C.

4. ЗАКОН ПАСКАЛЯ

Я что, супермен?



ГИ... ГИДРА-
ВЛИЧЕСКИЙ?
ПАСКАЛЬ?

В ПОКОЯЩЕЙСЯ ТОЧКЕ
ТЕКУЧЕЙ СРЕДЫ ДАВЛЕНИЕ
ОДИНАКОВО ПО ВЕЛИЧИНЕ В ЛЮБОМ
НАПРАВЛЕНИИ. ПРОСТО,
НЕ ТАК ЦП

ДРУГИМИ СЛОВАМИ, ЕСЛИ
ПРИЛОЖИТЬ ДАВЛЕНИЕ
К ОДНОМУ УЧАСТКУ ВОДЫ
В ЗАМКНУТОМ СОСУДЕ,
ТО ПО ВСЕМ НАПРАВЛЕНИЯМ
ПЕРЕДАЕТСЯ РАВНОЕ
ПО ВЕЛИЧИНЕ ДАВЛЕНИЕ.

ИЗВИНИ,
Я НЕМНОГО
ПЕРЕСКОЧИЛА.

ДАВАЙ ПОПРОБУЕМ
ПОФАНТАЗИРОВАТЬ.

ПРЕДСТАВЬ, ЧТО БОРЕЦ СУМО
ТОЛКНУЛ ЛЮДЕЙ В ПЕРЕ-
ПОЛНЕННОМ ВАГОНЕ МЕТРО.

ПРИНЯВШЕ ТОЛЧОК ПАССАЖИРЫ ТУТ ЖЕ ТОЛКНУТ
СТОЯЩИХ ПЕРЕД НИМИ, ТЕ ТОЛКНУТ СЛЕДУЮЩИХ,
И ТАК ДАЛЕЕ.

ЭТО НАЗЫВАЕТСЯ ЗАКОН ПАСКАЛЯ.

НО ОБРАТИ ВНИМАНИЕ, ЧТО ОДИНАКОВА
ВЕЛИЧИНА ДАВЛЕНИЯ, А СИЛА (\neq ДАВЛЕНИЕ
НА ПЛОЩАДЬ) НЕ БУДЕТ ОДИНАКОВОЙ!

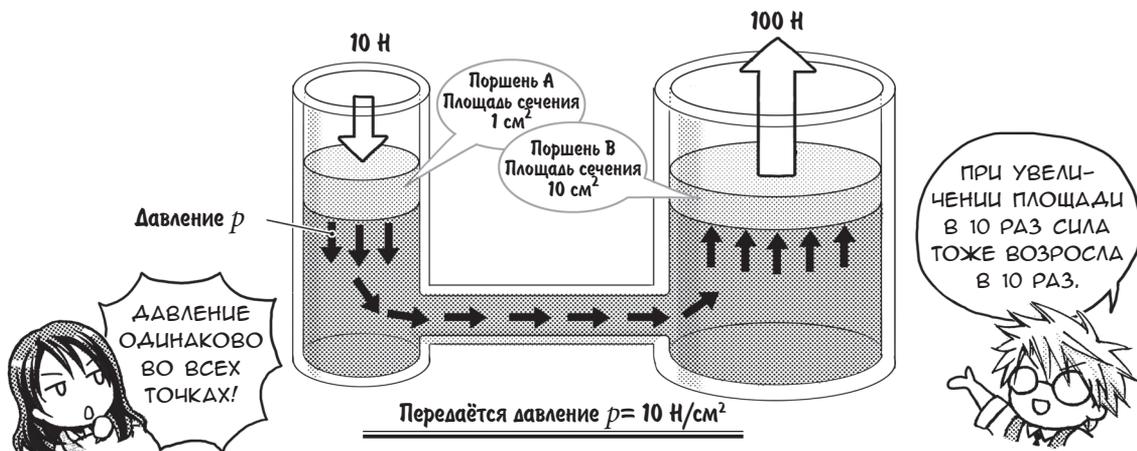
ТЫК!

В РЕЗУЛЬТАТЕ ДАВЛЕНИЕ ТОЛЧКА
ПЕРЕДАЕТСЯ ВСЕМ ЛЮДЯМ В ВАГОНЕ!

БЕЖАТЬ НЕКУДА! ПОХОЖЕ,
ОНО ДЕЙСТВИТЕЛЬНО
ПЕРЕДАЕТСЯ ВО ВСЕХ
НАПРАВЛЕНИЯХ!

Ой

ДЛЯ ОБЪЯСНЕНИЯ
ЗАКОНА ПАСКАЛЯ ЧАСТО
ИСПОЛЗУЮТ ВОТ ТАКОУ
РИСУНОК.



Если налить воды в трубку, подобную показанной на рисунке, то образуется две водные поверхности. Площадь водной поверхности в цилиндре В в 10 раз больше, чем в цилиндре А. Если приложить к левому поршню А силу величиной 10 Н, то на водной поверхности возникнет давление p . Согласно закону Паскаля, давление p передастся во все точки жидкости, поэтому на правой водной поверхности тоже возникнет давление p . В данном случае площадь водной поверхности в правом цилиндре В в 10 раз больше, поэтому сила, действующая на поршень В (давление \times площадь), будет в 10 раз больше силы, действующей на поршень А, то есть будет равна 100 Н.



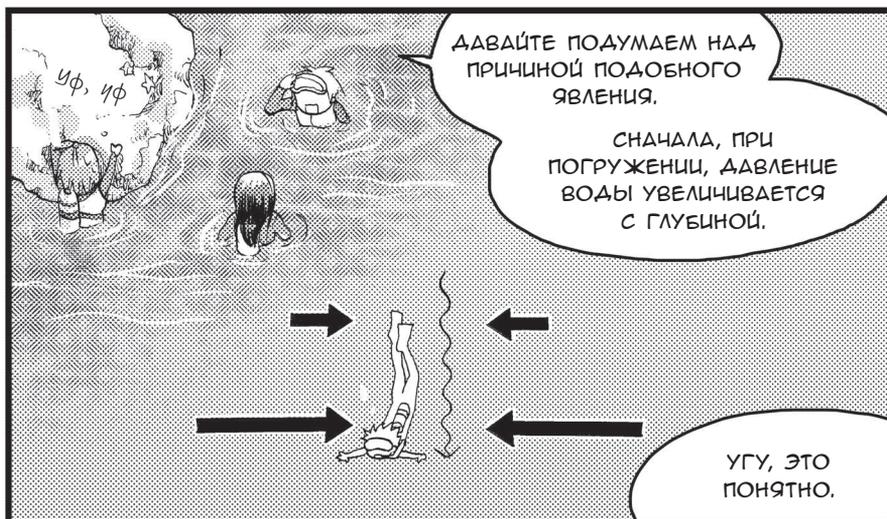
5. ЗАВИСИМОСТЬ ДАВЛЕНИЯ ОТ ВЫСОТЫ И ИЗМЕРЕНИЕ ДАВЛЕНИЯ

Отвези меня на дайвинг с аквалангом



ДЛЯ НАЧАЛА, КАК ВЫ
ОТНОСИТЕСЬ, НАПРИМЕР,
К ПОДВОДНОМУ ПЛАВАНИЮ?

БУЛЬ-БУЛЬ



НА ГЛУБИНЕ НА БАРАБАННУЮ ПЕРЕПОНКУ СНАРУЖИ ДЕЙСТВУЕТ ДАВЛЕНИЕ ВОДЫ.

ОДНАКО ИЗНУТРИ НА БАРАБАННУЮ ПЕРЕПОНКУ ДЕЙСТВУЕТ ТО ЖЕ ДАВЛЕНИЕ, КАКИМ ОНО БЫЛО НА ПОВЕРХНОСТИ. ИЗ-ЗА ЭТОГО БАРАБАННАЯ ПЕРЕПОНКА ПРОДАВЛИВАЕТСЯ ВОВНУТРЬ.

Барabanная перепонка

ПРИ РЕЗКОМ ПОДЪЁМЕ НА БОЛЬШУЮ ВЫСОТУ, НАПРИМЕР, В СКОРОСТНОМ ЛИФТЕ, ПРОИСХОДИТ ОБРАТНОЕ ЯВЛЕНИЕ, НО БОЛЬ В УШАХ ВСЁ РАВНО ВОЗНИКАЕТ.

ММ, ЧТО-ТО МНЕ СТАЛО СТРАШНО.

НА ГЛУБИНЕ, ИЛИ НАОБОРОТ, НА ВЫСОТЕ, СУЩЕСТВУЕТ РАЗНОСТЬ ДАВЛЕНИЙ, ПРИ РАСЧЁТЕ КОТОРОЙ ЗА ЭТАЛОН ПРИНИМАЕТСЯ ДАВЛЕНИЕ НА ПОВЕРХНОСТИ ЗЕМЛИ. ЕЁ ОБОЗНАЧАЮТ Δp .

ЗНАК Δ (ДЕЛЬТА) ОЗНАЧАЕТ "РАЗНОСТЬ", НО ИНОГДА ЕГО ТАКЖЕ ИСПОЛЬЗУЮТ ДЛЯ ВЫРАЖЕНИЯ "МАЛОСТИ".

(подробнее об этом см. на стр.35)

ЕСЛИ ПРИНЯТЬ ПЛОТНОСТЬ ТЕКУЧЕЙ СРЕДЫ ЗА ρ , А ВЫСОТУ НАД ПОВЕРХНОСТЬЮ ЗЕМЛИ (ИЛИ ВОДЫ) - ЗА h М, ТО РАЗНОСТЬ ДАВЛЕНИЙ Δp НА РАСТОЯНИИ h М ОТ ПОВЕРХНОСТИ БУДЕТ РАССЧИТЫВАТЬСЯ ВОТ ПО ТАКОЙ ФОРМУЛЕ.

Эталон - давление на поверхности воды

$\Delta p = \rho g h$

h (М)

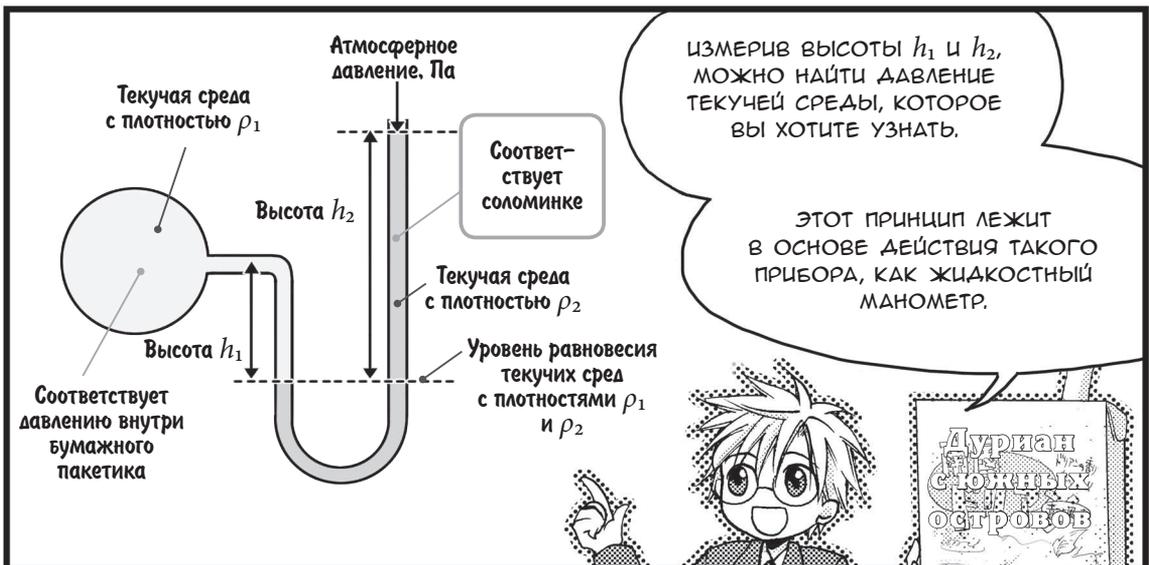
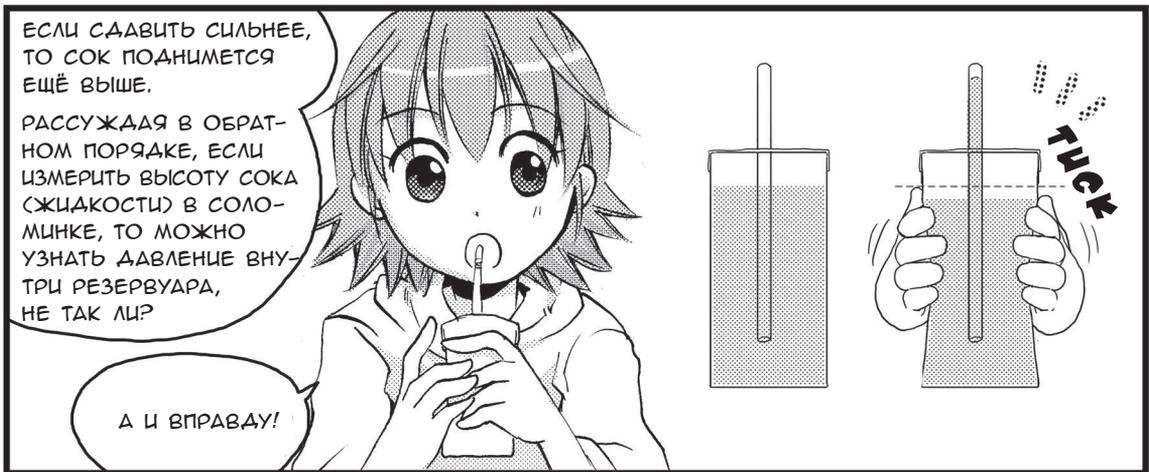
ЕДИНИЦЕЙ ИЗМЕРЕНИЯ ЯВЛЯЕТСЯ ПА (ПАСКАЛЬ), КОТОРЫЙ УЖЕ УПОМИНАЛСЯ В РАССКАЗЕ О ДАВЛЕНИИ.

РАЗНОСТЬ ДАВЛЕНИЙ $\Delta p =$ ПЛОТНОСТЬ ТЕКУЧЕЙ СРЕДЫ (ρ) \times УСКОРЕНИЕ СВОБОДНОГО ПАДЕНИЯ (g) \times РАЗНОСТЬ ВЫСОТ (h).

ЗНАЧИТ, ВОТ ТАК.

БОЛЬ В УШАХ СВЯЗАНА С РАЗНОСТЬЮ ДАВЛЕНИЙ.

АХ, СОВСЕМ ЗАБЫЛА!



Подробности см. на стр.37





О смысле знака Δ , который используется в обозначении Δp

Знак Δ , присутствующий в обозначении Δp (читается *дельта пэ*), имеет два смысла: *разность* и *малость*.



На стр.33 знак Δ используется в смысле *разности*, при вычислении которой в качестве эталона используется давление на поверхности земли.

С другой стороны, в значении *малости* этот знак аналогичен дифференциалу d и используется в следующем параграфе для объяснения *скорости* и *ускорения*, в главе 3 для объяснения градиента скорости (стр. 106), градиента давления (стр.120, 127).

Здесь возникает вопрос: почему этот знак можно использовать в смысле *мало*, но нельзя в смысле *много*? Причина в традициях. В математике принято обозначать буквами « ϵ , δ , Δ » малые величины.



Скорость и ускорение

Так как в уравнении движения на стр. 20 мы встретились с ускорением, расскажу здесь о скорости и ускорении поподробнее.

Скорость – это расстояние, проходимое в единицу времени (можно считать, что это 1 секунда).

Если тело за промежуток времени Δt [с] (здесь Δ означает *малость*) прошло расстояние Δx [м], то скорость u [м/с] будет равна $u = \Delta x / \Delta t$, не так ли?

Единицы измерения принято писать в скобках: [], чтобы отличать их от обозначений величин, например t или x . Буква «с» означает секунды, а «м» – метры. Отсюда следует, что единицей измерения скорости являются [м/с] (метры в секунду).

Теперь давайте выразим Δ , используя обозначение дифференциала d . Считайте, что знак Δ , использованный в смысле *малости*, и *дифференциал* – это одно и то же. Тогда получится, что скорость, которую мы записали как $u = \Delta x / \Delta t$, можно переписать как $u = dx / dt$.

Кстати, скорость указывает на направление, в котором движется тело, и как быстро оно туда движется, поэтому она является векторной величиной, имеющей значение и направление. Векторные величины принято выделять жирным шрифтом, чтобы отличать их от скалярных величин.

Далее, физическую величину, которая показывает изменение скорости в единицу времени, называют *ускорением*.

Ускорение является физической величиной, полученной дифференцированием скорости u по времени t , поэтому ускорение a [м/с²] можно выразить следующим образом:

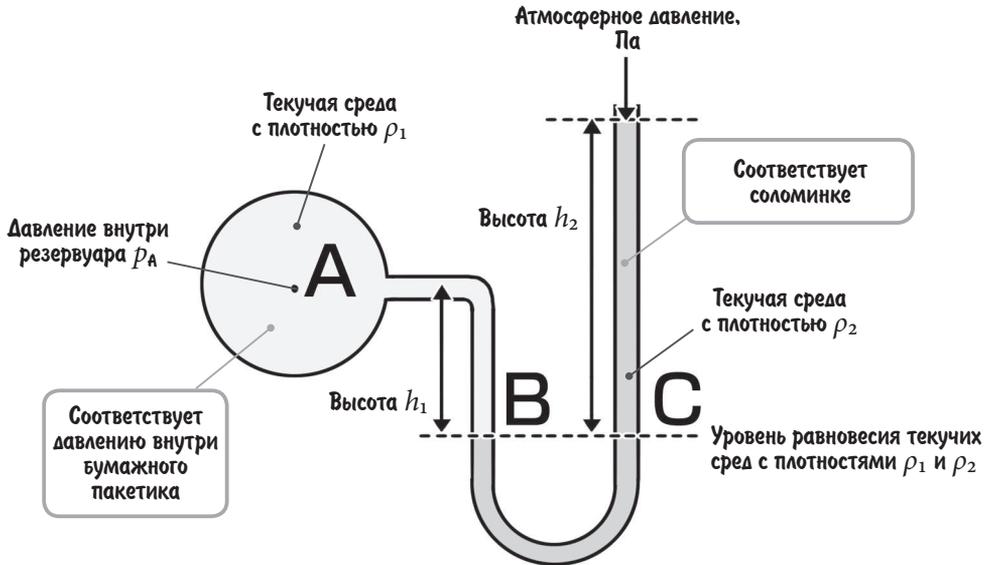
$$a = \partial u / \partial t = \partial^2 x / \partial t^2.$$

Другими словами, ускорение – это величина, которую получают, дважды продифференцировав координату x по времени t . Единица измерения ускорения – [м/с²] (метры в секунду в квадрате).

Жидкостный манометр



Только что я говорил, что прибор для измерения давления внутри резервуара называется жидкостным манометром. Здесь я объясню причину того, почему по уровням жидкости можно узнать давление внутри резервуара.



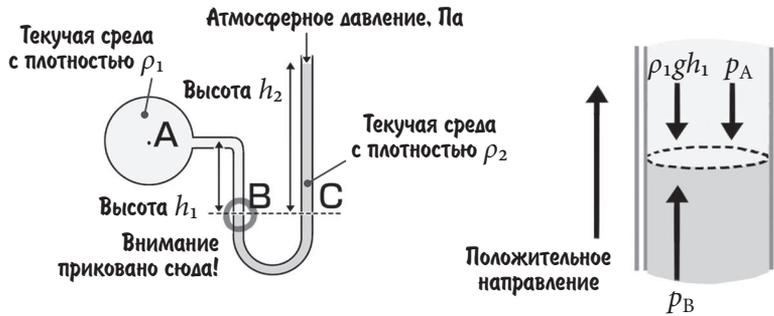
■ Рис. А-3. Принцип работы жидкостного манометра

Пусть мы хотим измерить давление в резервуаре, в котором находится текучая среда плотности ρ_1 . Подсоединяем к этому резервуару U-образную трубку, в которой находится текучая среда плотности ρ_2 , как показано на рис. А-3. Другой конец U-образной трубки находится под действием атмосферного давления p_0 . Мы должны найти давление p_A в точке А внутри резервуара.

Так как давление p_A больше, чем атмосферное давление p_0 , находящаяся внутри резервуара текучая среда плотности ρ_1 начнёт входить внутрь U-образной трубки, продвигаясь до точки В, а текучая среда плотности ρ_2 – подниматься по правому колену U-образной трубки. При достижении равновесия сил движение текучих сред прекратится.

В точке В левого колена сверху вниз действуют давление точки А p_A и давление столба высотой h_1 текучей среды ρ_1 , равное $\rho_1 g h_1$. Кроме того, в этой точке В действует давление p_B , направленное снизу вверх – текучие среды покоятся.

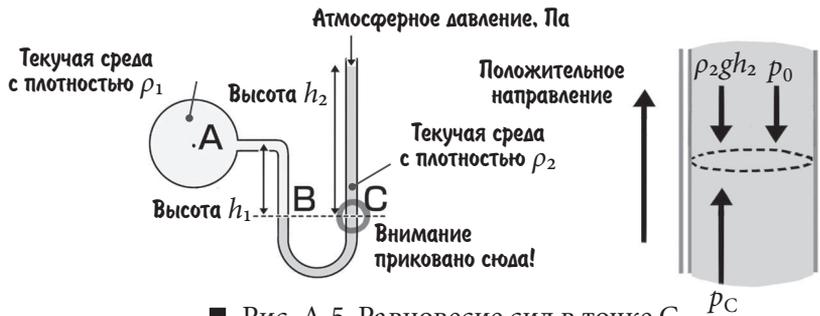
Давление – это сила, действующая на единичную площадь, поэтому попробуем составить уравнение равновесия сил, о котором было рассказано на стр. 23.



■ Рис. А-4. Равновесие сил в точке В

Если принять направление снизу вверх за положительное, то в точке В уравновешивают друг друга давления $-p_A$, $-\rho_1gh_1$ и p_B , как показано на рис. А-4. Уравнение равновесия будет таким:

$$p_B - \rho_1gh_1 - p_A = 0 \rightarrow p_B = \rho_1gh_1 + p_A \quad (1.1)$$



■ Рис. А-5. Равновесие сил в точке С

Далее, как показано на рис. А-5, в точке С правого колена сверху вниз действуют атмосферное давление p_0 и давление столба высотой h_2 текучей среды ρ_2 , равное ρ_2gh_2 . Кроме того, в этой точке С действует давление p_C , направленное снизу вверх – текучая среда покоится. Следовательно, уравнение равновесия сил в точке С будет таким:

$$p_C - \rho_2gh_2 - p_0 = 0 \rightarrow p_C = \rho_2gh_2 + p_0. \quad (1.2)$$

Далее, точки В и С находятся на одном уровне, поэтому давления в них одинаковы: $p_B = p_C$. Тогда из уравнений (1.1) и (1.2) следует, что абсолютное давление в точке А:

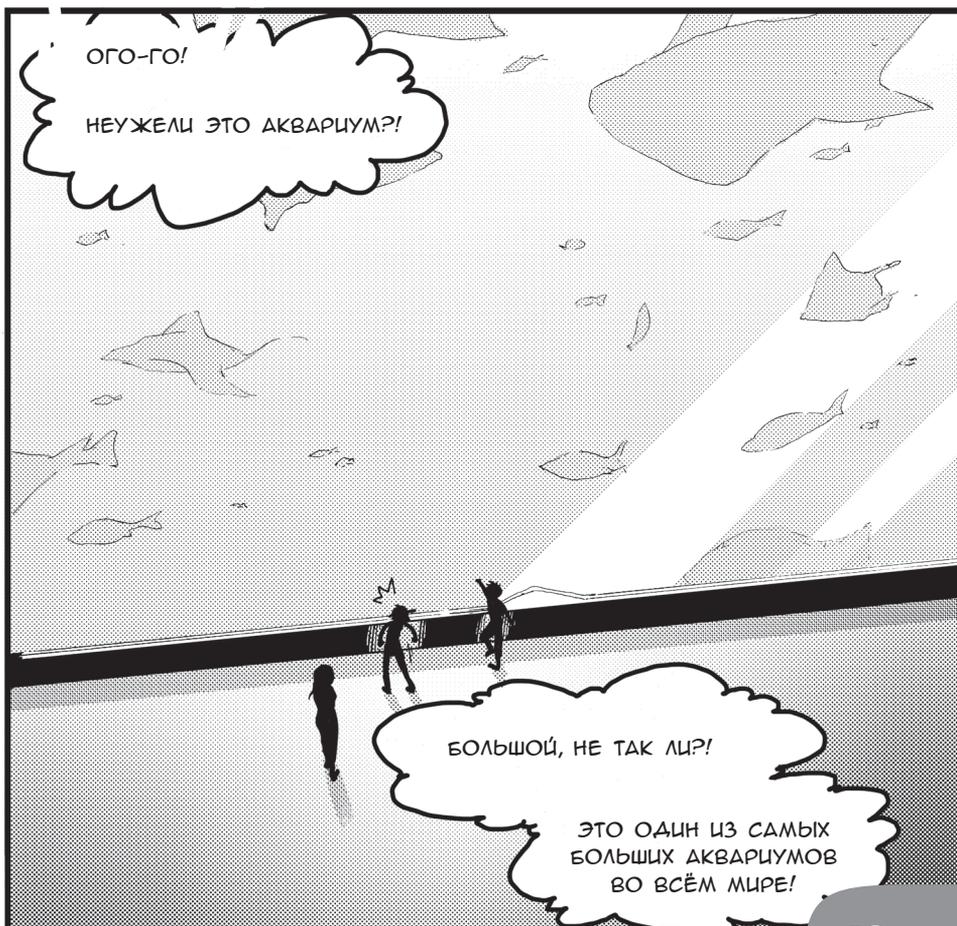
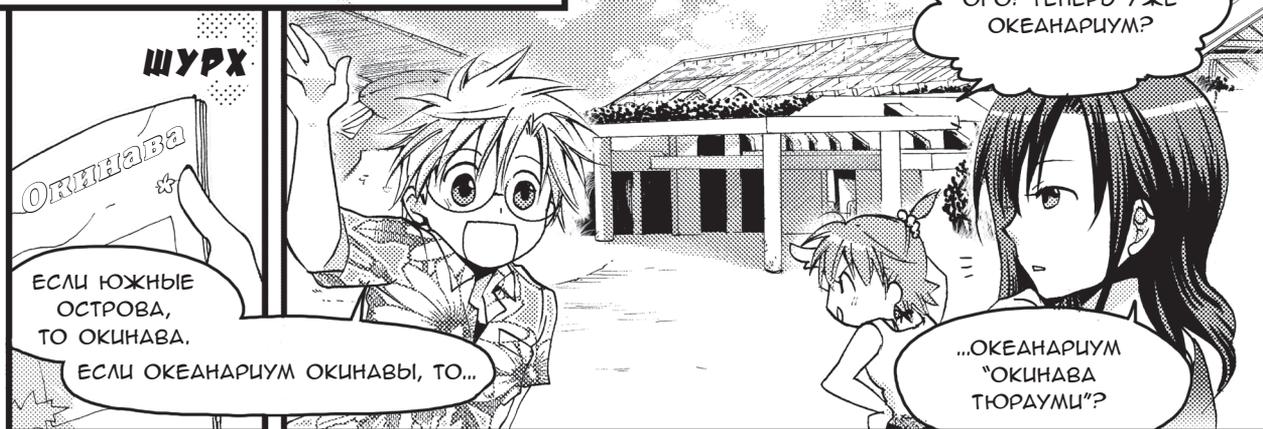
$$p_A = \rho_2gh_2 + p_0 - \rho_1gh_1 = g(\rho_2h_2 - \rho_1h_1) + p_0. \quad (1.3)$$

Кроме того, если перенести p_0 из правой части уравнения (1.3) в левую часть, то мы получим выражение для избыточного давления в точке А:

$$p_A - p_0 = g(\rho_2h_2 - \rho_1h_1). \quad (1.4)$$

6. ПОЛНОЕ ДАВЛЕНИЕ, ДЕЙСТВУЮЩЕЕ НА ПЛОСКУЮ СТЕНКУ

Очарованные в океанариуме



ДЛИНА ЭТОГО АКВАРИУМА
35 М, ШИРИНА - 27 М, ГЛУБИНА - 10 М,
ОБЪЁМ ВОДЫ - 7500 М³, ТО ЕСТЬ 7500 Т!
ФРОНТАЛЬНОЕ АКРИЛОВОЕ СТЕКЛО АКВАРИУ-
МА ТОЛЩИНОЙ 60 СМ ИМЕЕТ 8,2 М В ДЛИНУ И
22,5 М В ШИРИНУ, А ОБЩИЙ ВЕС ПАНЕЛИ -
135 Т!

КАКОЙ
ЗДОРОВЕННЫЙ

У СИРАИСИ
ДАЖЕ ВЗГЛЯД
ИЗМЕНИЛСЯ!

ПАНЕЛЬ, КОТОРАЯ МОЖЕТ ВЫДЕРЖАТЬ
ДАВЛЕНИЕ АЖ 7500 Т ВОДЫ.
ВОТ ЭТО ДА!

7500 Т - ЭТО ТАК МНОГО,
ЧТО Я ДАЖЕ ПРЕДСТАВИТЬ
НЕ МОГУ.

С ЧЕМ БЫ ЭТО
СРАВНИТЬ?

...ЗНАЧИТ, МАССА ВОДЫ
В АКВАРИУМЕ
СООТВЕТСТВУЕТ ПРИМЕРНО
1000 АФРИКАНСКИХ
СЛОНОВ!

ТУРУ!

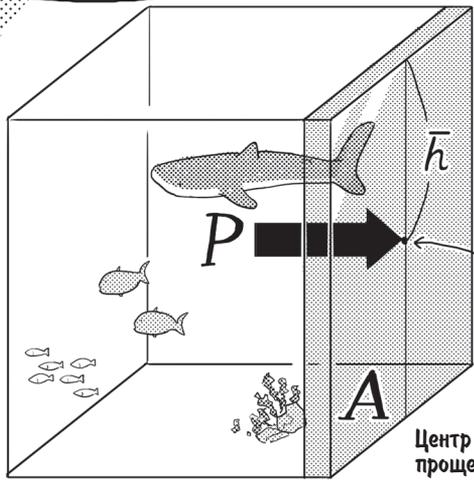
ОДНА КРУПНАЯ ОСОБЬ
АФРИКАНСКОГО СЛОНА
ВЕСИТ ОКОЛО 7,5 Т,...

КАК СТРАШНО,
ЕСЛИ ОНО ВДУРГ
РАЗОБЬЁТСЯ!

НЕ БЕСПОКОЙСЯ,
ПРИ ЕГО ПРОЕКТИРОВА-
НИИ БЫЛИ ПРОВЕ-
ДЕНЫ ОСНОВАТЕЛЬ-
НЫЕ РАСЧЁТЫ.

ПОЛНОЕ ДАВЛЕНИЕ P РАВНО
ПРОИЗВЕДЕНИЮ ПЛОТНОСТИ
ТЕКУЧЕЙ СРЕДЫ ρ , УСКОРЕНИЯ
СВОБОДНОГО ПАДЕНИЯ g ,
ГЛУБИНЫ ТОЧКИ ЦЕНТРА
ТЯЖЕСТИ \bar{h} И ПЛО-
ЩАДИ СТЕНКИ A .

ГМ, О ПОЛНОМ
ДАВЛЕНИИ P Я УЖЕ,
КАЖЕТСЯ, ГДЕ-ТО
СЛЫШАЛА.



Центр
тяжести

Центр тяжести - это,
проще говоря, самая
середина стенки!

ПРЕЖДЕ ВСЕГО, ПОЛНОЕ
ДАВЛЕНИЕ НА ПАНЕЛЬ,
ОБОЗНАЧАЕМОЕ P ,
ВЫРАЖАЕТСЯ ВОТ ТАКОЙ
ФОРМУЛОЙ.

$$P = \rho g \bar{h} A$$

Полное
давление

=

Плотность
текущей
среды

×

Ускорение
свободного
падения

×

Глубина
центра
тяжести

×

Площадь
стенки

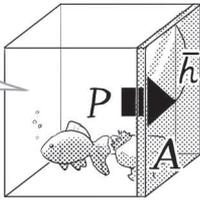
АА, Я УЖЕ ГОВОРИЛА,
ЧТО УМНОЖИВ ДАВЛЕНИЕ p
НА ПЛОЩАДЬ A , МЫ ПОЛУЧИМ
ПОЛНОЕ ДАВЛЕНИЕ P .

Давление в центре тяжести ($\rho g \bar{h}$)

ДРУГИМИ СЛОВАМИ, ТАК КАК
 $\rho g \bar{h}$ - ЭТО ДАВЛЕНИЕ В ЦЕНТРЕ
ТЯЖЕСТИ СТЕНКИ, ПОЛНОЕ
ДАВЛЕНИЕ БУДЕТ РАВНО:

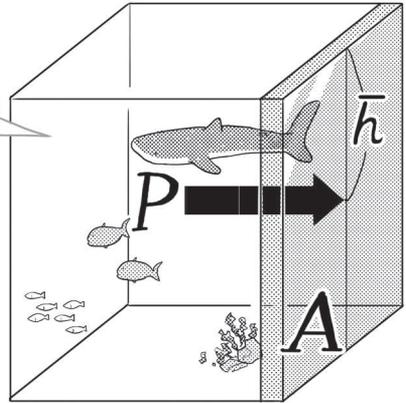
$$P = \rho g \bar{h} A$$

Маленький
аквариум



$$P = \rho g \bar{h} A$$

Большой
аквариум



$$P = \rho g \bar{h} A$$

У БОЛЬШОГО
АКВАРИУМА h
И A БОЛЬШЕ,
ПОЭТОМУ P ТОЖЕ
БУДЕТ ВЕЛИКО.

ЧТОБЫ ВЫДЕРЖАТЬ
БОЛЬШОЕ P , СТЕНКА
ДОЛЖНА БЫТЬ
ТОЛСТОЙ.

ПОНЯТНО! ВОТ
ПОЧЕМУ ПАНЕЛИ
ОКЕАНАРИУМА
"ТЮРАУМЦ" ТАКИЕ
ТОЛСТЫЕ.

ЕСЛИ ПОДУМАТЬ,
ОКЕАНАРИУМ САМ ПО СЕБЕ
ТОЖЕ ВПЕЧАТЛЯЕТ!

КРУТЬ

КАКОЕ ОКАЗЫВАЕТСЯ
БЕЛОЕ БРЮХО
У МАНТЫ.

7. СИЛА ПЛАВУЧЕСТИ



Почему корабли не тонут?

ДА, ХОРОШО
НА ОКИНАВЕ.
ХОТЬ РАЗОК
ХОТЕЛОСЬ БЫ СЪЕЗДИТЬ
ТУДА ОСНОВАТЕЛЬНО.

Ро го
бу

Окинава

Гостиница
Киево
и Окинава

Посетим
Тюраму!

Лучший ресторан
свежей морепродукции
Тюрама! Кухня

Посетим тур
по островам

ХЛОП

ДА, НЕ ТАК ЛИ?

СИНЕЕ МОРЕ...
БЕЛЫЙ ПЕСОК...
ДАЛЕКИЙ ГОРИЗОНТ...

ОЙ, СОВСЕМ ЗАБЫЛА!
СИРАИСИ!

ПОЧЕМУ КОРАБЛИ НЕ ТОНУТ?
ТЫ ВЕДЬ МНЕ ЕЩЕ
НЕ ОБЪЯСНИЛ!

А-А-А!

А-А!

ВЕДЬ НЕ ПОТОМУ, ЧТО
У НИХ НИЗКАЯ ПЛОТНОСТЬ,
КАК У ЖИРА?!
А МОЖЕТ БЫТЬ...

...НА САМОМ ДЕЛЕ, ВСЕ
КОРАБЛИ СДЕЛАНЫ
ИЗ ЖИРА,

ПРОСТО МЫ
ОБ ЭТОМ НЕ ЗНАЕМ?



НЕТ, К СОЖАЛЕНИЮ,
КОРАБЛИ СДЕЛАНЫ
ИЗ ЖЕЛЕЗА.

КОРАБЛИ НЕ ТОНУТ,
ПОТОМУ ЧТО В ФОРМЕ
ИХ КОРПУСОВ ЕСТЬ
ОДИН СЕКРЕТ.

ТУ-У-У ТУ-У-У

В САМОМ ДЕЛЕ, КОРАБЛИ
СДЕЛАНЫ ИЗ ЖЕЛЕЗА,
НО ИХ ФОРМА
НАПОМИНАЕТ ТАЗ.



Эта
форма



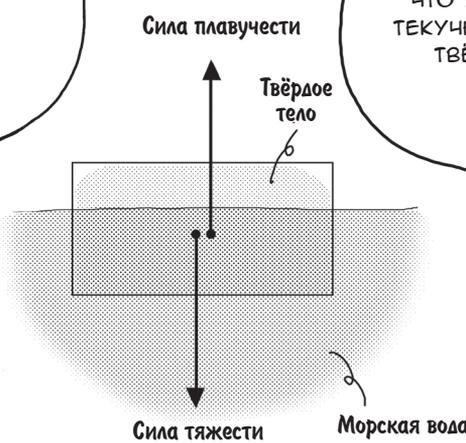
СИЛА ПЛАВУЧЕСТИ ПО ВЕЛИЧИНЕ РАВНА ВЕСУ ТЕКУЧЕЙ СРЕДЫ, ВЫТЭСНЕННОЙ ТЕЛОМ, А НАПРАВЛЕНА ОНА ВЕРТИКАЛЬНО ВВЕРХ.

$$B = \rho g V$$

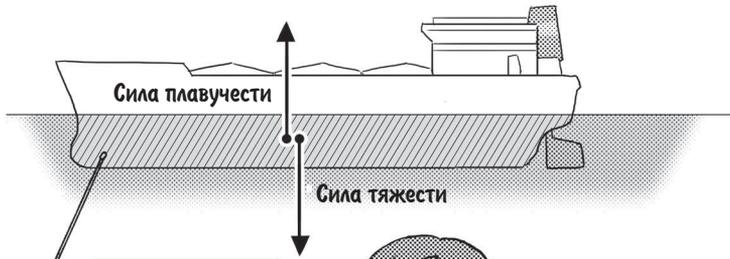
СИЛА ПЛАВУЧЕСТИ B ВЫРАЖАЕТСЯ ФОРМУЛОЙ $B = \rho g V$, ГДЕ ρ - ПЛОТНОСТЬ ТЕКУЧЕЙ СРЕДЫ, V - ОБЪЁМ ТЕКУЧЕЙ СРЕДЫ, ВЫТЭСНЕННОЙ ТЕЛОМ

СЛЕДУЕТ ОБРАТИТЬ ВНИМАНИЕ, ЧТО ЗАЕЗЬ ρ - ЭТО ПЛОТНОСТЬ ТЕКУЧЕЙ СРЕДЫ, А НЕ ПЛОТНОСТЬ Твёрдого тела (ТАЗА, ИЛИ КОРАБЛЯ).

ЭТА ПЛОТНОСТЬ ТЕКУЧЕЙ СРЕДЫ СООТВЕТСТВУЕТ ПЛОТНОСТИ МОРСКОЙ ВОДЫ.



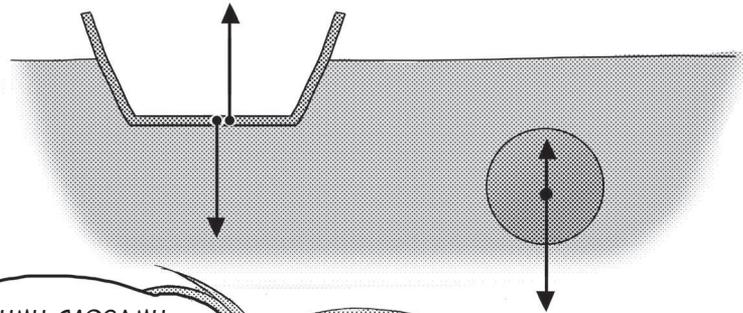
А ЗАШТРИХОВАННАЯ ЧАСТЬ - ОБЪЁМ ТЕКУЧЕЙ СРЕДЫ, ВЫТЕСНЕННОЙ ТЕЛОМ, ТО ЕСТЬ V .



$$B = \rho g V$$

Сила плавучести =
 Плотность текучей среды \times
 Ускорение свободного падения \times
 Объём текучей среды,
 вытесненной телом

АГА!



ДРУГИМИ СЛОВАМИ, ЕСЛИ СРАВНИТЬ ЖЕЛЕЗНЫЙ ТАЗ С ЖЕЛЕЗНЫМ ШАРОМ ТАКОГО ЖЕ ОБЪЁМА, ТО ТАЗ ВЫТЕСНИТ БОЛЬШЕ ВОДЫ, ПОЭТОМУ ЕГО СИЛА ПЛАВУЧЕСТИ БУДЕТ ВЫШЕ!

ДА, ДА!
 Я ПОНЯЛА,
 ПОЧЕМУ КОРАБЛИ
 НЕ ТОНУТ.

ТЫК!

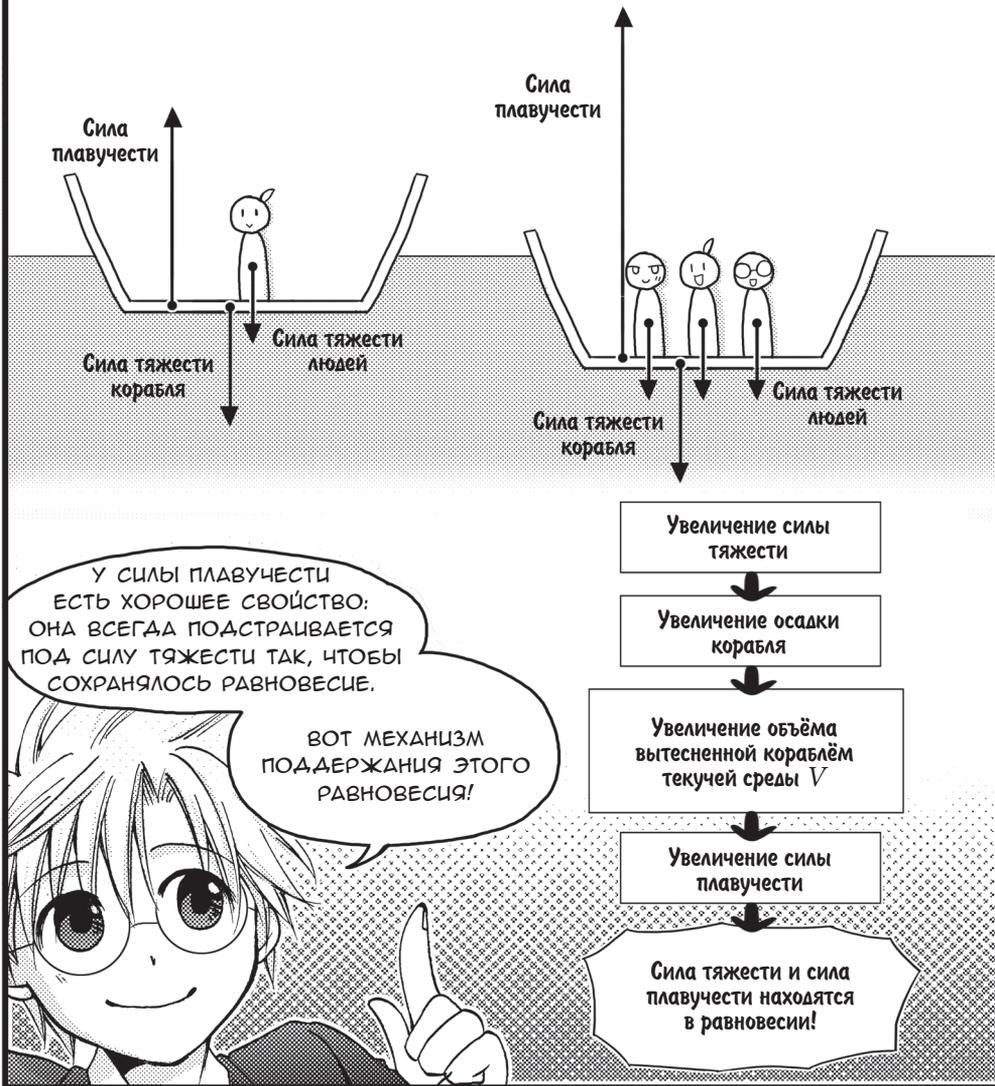
ДА, ЭТО ТАК.
 КОНКРЕТНО
 ГОВОРЯ,

ТАКАЯ ФОРМА УВЕЛИЧИВАЕТ
 ОБЪЁМ ТЕКУЧЕЙ СРЕДЫ,
 ВЫТЕСНЕННОЙ ТЕЛОМ,
 ТО ЕСТЬ V .

НО, НО, А ЕСЛИ ТАМ БУДЕТ НЕ ТОЛЬКО ВОЗДУХ, НО И ЛЮДИ, ГРУЗЫР!

ЕСЛИ КОРАБЛЬ НАГРУЗИТЬ, ТО СИЛА ТЯЖЕСТИ СТАНЕТ БОЛЬШЕ, ЧЕМ СИЛА ПЛАВУЧЕСТИ, И ОН ПОТОНЕТ!

УСПОКОЙСЯ,
 ЭКИ-САН!





ДА! БЫЛО
ПОНЯТНО
И УВЛЕКАТЕЛЬНО.

У ТЕБЯ ТАЛАНТ,
СИРАЦСИ!

Я ОЧЕНЬ
РАД.



ДА,
ОДНАКО.

СЕГОДНЯ МЫ, ЧИТАЯ ТУРИСТИЧЕСКИЕ ПАМФЛЕТЫ,
СОВЕРШИЛИ ВООБРАЖАЕМОЕ ПУТЕШЕСТВИЕ.

НО Я НЕ УДОВЛЕТВОРЕНА! ТАК НЕ ИНТЕРЕСНО!

Я ХОЧУ ОТПРАВИТЬСЯ
В НАСТОЯЩЕЕ ПУТЕШЕСТВИЕ!
ПОНЯТНО, АКАНЭ?!

ХВАТЬ!

**АЙ,
ОТСТАНЬ!**

ПУТЕШЕСТВИЕ? КУДА?
И ЧТО МЫ ТАМ БУДЕМ
ДЕЛАТЬ?

НО ВЕДЬ ТЫ САМА
ГОВОРИЛА, ЧТО ПРАКТИКА -
ПУТЬ К СОВЕРШЕНСТВУ!

МЫ ДОЛЖНЫ ПОЕХАТЬ НА ПРИРОДУ
И ТАМ КОЖЕЙ ПОЧУВСТВОВАТЬ
МЕХАНИКУ ТЕКУЩИХ СРЕД!

Я... Я ТОЖЕ
НЕ ПРОТИВ ТАКОЙ
ПОЕЗДКИ.

**СВЕРК,
СВЕРК**

НУ...
ЛАДНО.

!

ОДНАКО У НАС НЕТ
ВРЕМЕНИ, КРОМЕ
СЛЕДУЮЩИХ
КАНИКУЛ.



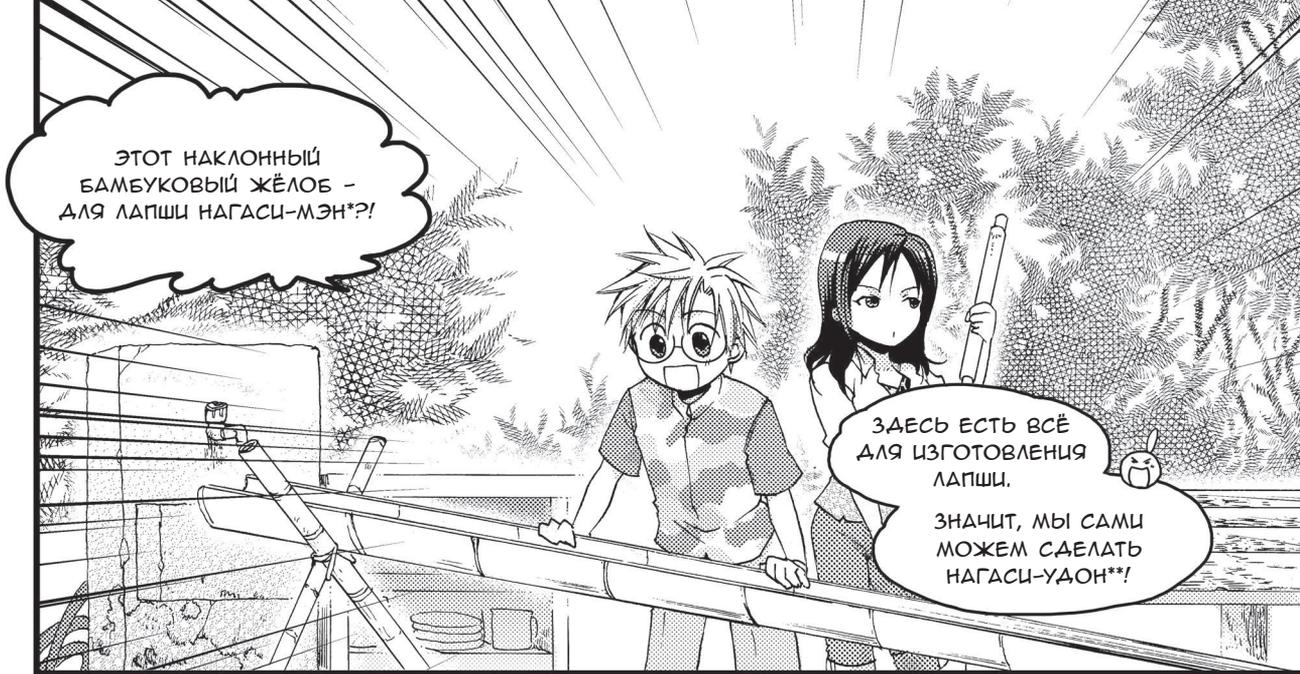
Глава 2

ОСНОВНЫЕ УРАВНЕНИЯ ТЕЧЕНИЯ



1. РАЗНООБРАЗНЫЕ ТЕРМИНЫ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ В МЕХАНИКЕ ТЕКУЧИХ СРЕД





ЭТОТ НАКЛОННЫЙ
БАМБУКОВЫЙ ЖЕЛОБ -
ДЛЯ ЛАПШИ НАГАСИ-МЭН*?!

ЗДЕСЬ ЕСТЬ ВСЁ
ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ
ЛАПШИ.
ЗНАЧИТ, МЫ САМИ
МОЖЕМ СДЕЛАТЬ
НАГАСИ-УАОН**!



ТЫ КАК ВСЕГДА
ОЧЕНЬ НАБЛЮДА-
ТЕЛЕН, СИРАУСИ!

А ЕЩЁ ЭТО МОЖНО
ИСПОЛЬЗОВАТЬ ДЛЯ
ОБЪЯСНЕНИЯ МЕХАНИКИ
ТЕКУЩИХ СРЕД.



ИТАК, НАЧИНАЕМ ПРИГОТОВЛЕНИЕ
НАГАСИ-УАОН, СОВМЕЩЁННОЕ
С УЧЁБОЙ.

СЕГОДНЯ Я ОЗНАКОМУ ВАС
С НЕКОТОРЫМИ ТЕРМИНАМИ, ТЕО-
РЕМАМИ И ФОРМУЛАМИ, ИСПОЛЬЗУ-
ЕМЫМИ В МЕХАНИКЕ ТЕКУЩИХ СРЕД!



НАКОНЕЦ-ТО МЫ НАЧИНАЕМ
ИЗУЧАТЬ НАСТОЯЩУЮ
МЕХАНИКУ ТЕКУЩИХ СРЕД.

Я БУДУ
СТАРАТЬСЯ!

УРА!



СНАЧАЛА ОТМЕРИМ
ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ
ИНГРЕДИЕНТЫ.

Раз, два. Я так люблю готовить.

КУЛИНАРИЯ -
ЕГО КОНЁК!

*Нагаси-мэн: один из традиционных способов употребления японской лапши - «лапша, текущая по ручью» (прим. перев.)

**Нагаси-удон: удон (вид лапши), употребляемый способом Нагаси-мэн (прим. перев.)

Пожалуйста, не изменяйся
(Стационарное и нестационарное течения)

ПЛЕСК



ДЛЯ НАЧАЛА
Я РАССКАЖУ О СТАЦИОНАРНОМ ТЕЧЕНИИ И НЕСТАЦИОНАРНОМ ТЕЧЕНИИ.



КАНИСТРА С ВОДОЙ? ЗАЧЕМ, ВЕДЬ ЕСТЬ КРАН?

ДЛЯ ОБЪЯСНЕНИЯ ЭТО ПОДХОДИТ ЛУЧШЕ, ЧЕМ ВОДОПРОВОД.



ЕСЛИ МЫ ОТКРОЕМ КРАН, ТО ВОДА БУДЕТ ТЕЧЬ С ПОСТОЯННОЙ СКОРОСТЬЮ, СКОЛЬКО БЫ ВРЕМЕНИ НЕ ПРОШЛО.

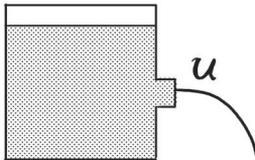
Скорость u = константа

ТАКОЕ ТЕЧЕНИЕ, СКОРОСТЬ КОТОРОГО НЕ ИЗМЕНЯЕТСЯ ВО ВРЕМЕНИ, НАЗЫВАЕТСЯ "СТАЦИОНАРНЫМ ТЕЧЕНИЕМ".

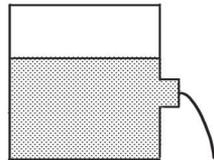
Далее в тексте скорость основного потока обозначается как u .

НАПРОТИВ, В СЛУЧАЕ ЭТОЙ КАНИСТРЫ, С ТЕЧЕНИЕМ ВРЕМЕНИ УРОВЕНЬ ВОДЫ В НЕЙ Понижается, и вместе с этим уменьшается скорость воды, льющейся из горлышка.

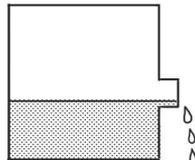
ТАКОЕ ТЕЧЕНИЕ, СКОРОСТЬ КОТОРОГО ИЗМЕНЯЕТСЯ С ТЕЧЕНИЕМ ВРЕМЕНИ, НАЗЫВАЕТСЯ "НЕСТАЦИОНАРНЫМ ТЕЧЕНИЕМ".



Сильная струя



Постепенное замедление



Прекращение



ЭКИ! ТЫ ОПЯТЬ КРАН НЕ ЗАКРЫЛА!

Извиняюсь.

И что и Эки дома твоя-рится?

ЗНАЧИТ ВОДА, ТЕКУЩАЯ ИЗ ВОДОПРОВОДНОГО КРАНА - ЭТО СТАЦИОНАРНОЕ ТЕЧЕНИЕ, А ИЗ КАНИСТРЫ - НЕСТАЦИОНАРНОЕ? К СЛОВУ, МЕНЯ ДОМА ЧАСТО РУГАНУТ ЗА ТО, ЧТО Я ЗАБЫВАЮ ЗАКРЫТЬ КРАН.

ДА?!



☹ Скорость и направление (Однородное и неоднородное течения)

ТЕПЕРЬ ПОПРОБУЕМ
ПУСТИТЬ ВОДУ ИЗ КРАНА
В БАМБУКОВЫЙ ЖЁЛОБ.



ПОЛОЖИМ, ЧТО ВОДА,
ЛЬЮЩАЯСЯ В ЭТОТ ЖЁЛОБ,
ТЕЧЁТ С ОДИНАКОВОЙ СКО-
РОСТЬЮ НА ВСЕХ УЧАСТКАХ
НИЖНЕЙ ЧАСТИ ЖЁЛОБА.

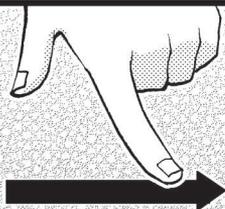


ВЫБЕРЕМ ТОЧКУ ОТСЧЁТА
О РОВНО ПОСЕРЕДИНЕ
ШИРИНЫ ЖЁЛОБА И ПРИМЕМ
НАПРАВЛЕНИЕ ТЕЧЕНИЯ ЗА
ОСЬ x , А ПЕРПЕНДИКУЛЯР
К НЕМУ - ЗА ОСЬ y .

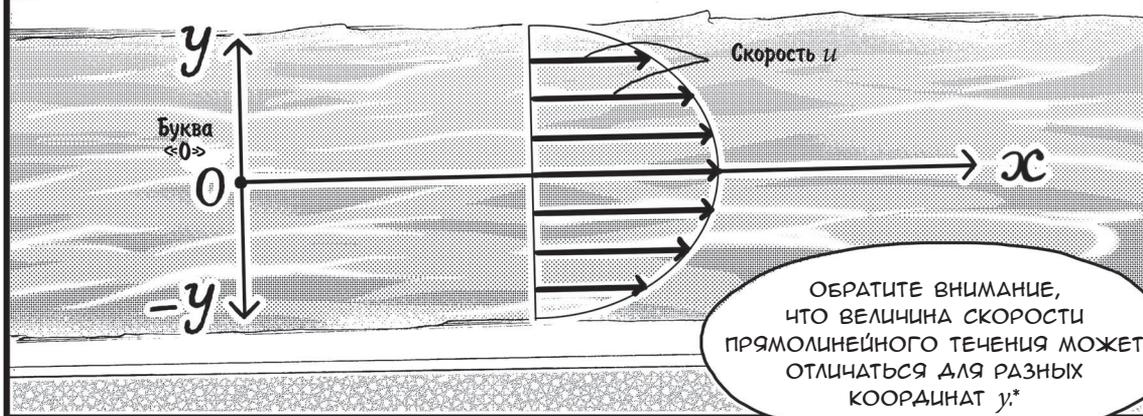
* Строго говоря, очень маленькая v всё же существует, но здесь мы её проигнорируем.

НАПРАВЛЕННАЯ ВДОЛЬ ОСИ x
СКОРОСТЬ u СУЩЕСТВУЕТ,
ОАНАКО ВДОЛЬ ОСИ y
СКОРОСТЬ v ОТСУТСТВУЕТ.*

Т.О., СОСТАВЛЯЮЩИЕ СКОРО-
СТИ ВДОЛЬ ВСЕХ НАПРАВЛЕНИЙ,
КРОМЕ ОПРЕДЕЛЁННОГО,
РАВНЫ 0.



ТАКОЕ ТЕЧЕНИЕ В ОДНОМ
НАПРАВЛЕНИИ НАЗЫВАЕТСЯ
"ПРЯМОЛНЕЙНЫМ ТЕЧЕНИЕМ".



ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ,
ЧТО ВЕЛИЧИНА СКОРОСТИ
ПРЯМОЛНЕЙНОГО ТЕЧЕНИЯ МОЖЕТ
ОТЛИЧАТЬСЯ ДЛЯ РАЗНЫХ
КООРДИНАТ y .*

* Причина отличия скорости в зависимости от координаты y подробно объяснена на стр.107.

ЕСЛИ ЖЕ ОДНОВРЕМЕННО СО
СКОРОСТЬЮ u СУЩЕСТВУЕТ ТАК-
ЖЕ СКОРОСТЬ v , НАПРАВЛЕННАЯ
ВДОЛЬ ОСИ y , ТО РЕЧЬ ИДЁТ
О "КРИВОЛНЕЙНОМ ТЕЧЕНИИ"

А ЧТО, ВДОЛЬ
ОСИ y ТОЖЕ ЕСТЬ
ТЕЧЕНИЕ?



ДА.
ПОМЕСТИМ В ПОТОК
ЭТУ ТОЛКУШКУ
ДЛЯ ЛАПШИ,...



КАК ТЕЧЁТ ВОДА?
НЕ СОВСЕМ
ПОНЯТНО, ДА?



АА.



ТОГДА ДАВАЙТЕ
ИСПОЛЗУЕМ ВОТ
ЭТО!

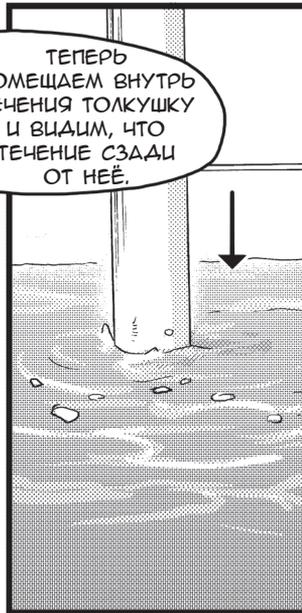
СПОСОБ УВИДЕТЬ
НЕВИДИМОЕ ТЕЧЕНИЕ
- "ВИЗУАЛИЗАЦИЯ
ТЕЧЕНИЯ"!

СИЛЬНАЯ
МУКА?

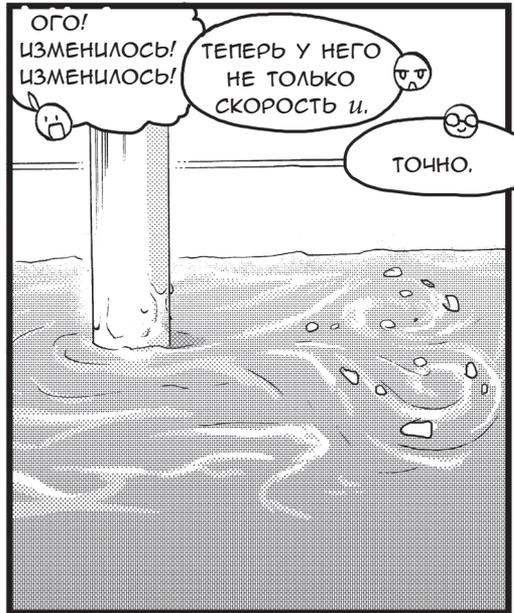
* Сильная мука содержит много белковых веществ и дает большой выход сырой клейковины.



СЕЙЧАС МЫ ВИДИМ
"ПРЯМОЛИНЕЙНОЕ ТЕЧЕНИЕ",
КОТОРОЕ ИМЕЕТ ТОЛЬКО
СКОРОСТЬ u , НАПРАВЛЕННУЮ
ВДОЛЬ ОСИ x .



ТЕПЕРЬ
ПОМЕЩАЕМ ВНУТРЬ
ТЕЧЕНИЯ ТОЛКУШКУ
И ВИДИМ, ЧТО
ТЕЧЕНИЕ СЗДАИ
ОТ НЕЁ.



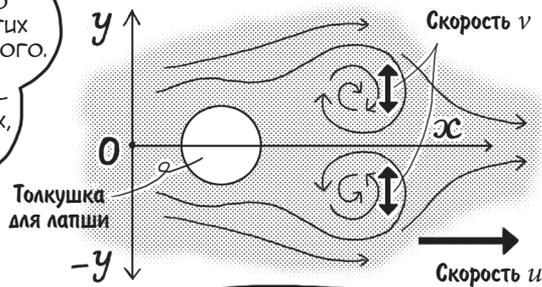
ОГО!
ИЗМЕНИЛОСЬ!
ИЗМЕНИЛОСЬ!

ТЕПЕРЬ У НЕГО
НЕ ТОЛЬКО
СКОРОСТЬ u .

ТОЧНО.

В ЭТОМ СЛУЧАЕ МОЖНО СКАЗАТЬ, ЧТО
ТЕЧЕНИЕ ИМЕЕТ СКОРОСТИ ВДОЛЬ ДРУГИХ
НАПРАВЛЕНИЙ, ОТЛИЧНЫХ ОТ ОПРЕДЕЛЁННОГО.

ДРУГИМИ СЛОВАМИ, СУЩЕСТВУЕТ СКО-
РОСТЬ u , НАПРАВЛЕННАЯ ВДОЛЬ ОСИ x ,
НО СУЩЕСТВУЕТ ТАКЖЕ СКОРОСТЬ v ,
НАПРАВЛЕННАЯ ВДОЛЬ ОСИ y .



ВОТ ОНО
ЧТО!

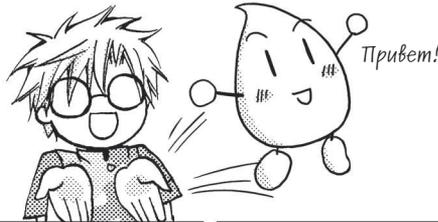
ТЕЧЕНИЕ, У КОТОРОГО
НАПРАВЛЕНИЕ СКОРОСТИ РАЗНОЕ
В РАЗНЫХ ТОЧКАХ, НАЗЫВАЕТСЯ
"КРИВОЛИНЕЙНЫМ ТЕЧЕНИЕМ".

Привет, я – частица текучей среды!

(Скорость текучей среды и расход текучей среды)

ТЕПЕРЬ Я РАССКАЖУ
О СКОРОСТИ ТЕКУЧЕЙ СРЕДЫ
И РАСХОДЕ ТЕКУЧЕЙ СРЕДЫ.

ДЛЯ НАЧАЛА ПРЕДСТАВЬТЕ,
ЧТО ВОДА СОСТОИТ ВОТ ИЗ
ТАКИХ МАЛЫШЕЙ – ЧАСТИЦ
ТЕКУЧЕЙ СРЕДЫ.

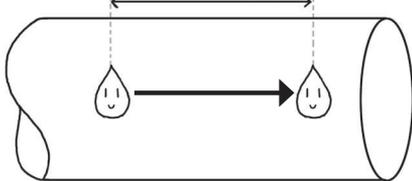


НУ,
ВОДА ВЕДЬ ТОЖЕ
СОСТОИТ ИЗ МНОЖЕСТВА
МОЛЕКУЛ ВОДЫ.



Разговор о скорости текучей среды

За $t = 1$ с прошёл расстояние $l = 3$ м



$$\text{Скорость текучей среды } u = \frac{\text{Пройденное расстояние } l}{\text{Время } t}$$

значит в этом случае мы получим
3 м/с. не так ли?



Единицы измерения такие же, как для обычной скорости!

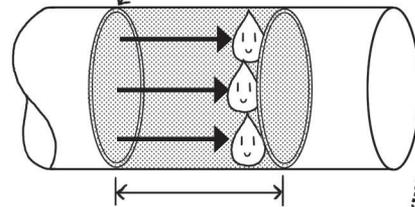


ВЕЛИЧИНУ, ПОКАЗЫВАЮЩУЮ
"СКОРОСТЬ, С КОТОРОЙ ТЕЧЁТ
ТЕКУЧАЯ СРЕДА", НАЗЫВАЮТ
"СКОРОСТЬЮ ТЕКУЧЕЙ СРЕДЫ".

НЕОБХОДИМО ПОМНИТЬ О ТОМ, ЧТО
СКОРОСТЬ ТЕКУЧЕЙ СРЕДЫ ЯВЛЯЕТСЯ
ВЕКТОРНОЙ ВЕЛИЧИНОЙ.

Разговор о расходе текучей среды

Проходное сечение $A = 6 \text{ м}^2$



Скорость текучей среды $u = 3 \text{ м/с}$

Расход текучей среды $Q =$
 $=$ Проходное сечение $A \times$
 \times Скорость текучей среды u ,
значит в этом случае мы получим
 $18 \text{ м}^3/\text{с}$. не так ли?



Единицы измерения похожи на единицы измерения скорости текучей среды!



ВЕЛИЧИНУ, ПОКАЗЫВАЮЩУЮ
"ОБЪЁМ ТЕКУЧЕЙ СРЕДЫ,
ПРОХОДЯЩИЙ ЧЕРЕЗ ПЛОЩАДЬ
СЕЧЕНИЯ ПОТОКА В ЕДИНИЦУ
ВРЕМЕНИ", НАЗЫВАЮТ
"РАСХОДОМ ТЕКУЧЕЙ СРЕДЫ".

А, я поняла.

Механика	Скорость	Объём	Масса
Механика текучих сред	Скорость текучей среды	Расход текучей среды = объём в единицу времени	Плотность* = масса единицы объёма

* При рассмотрении массы текучей среды используют плотность. См. стр. 73.



ЕСЛИ СОПОСТАВИТЬ ОБЫЧНУЮ МЕХАНИКУ И МЕХАНИКУ ТЕКУЩИХ СРЕД, ТО ПОЛУЧИТСЯ ВОТ ТАКАЯ ТАБЛИЦА.

ДА, НЕ ТАК ЛИ?

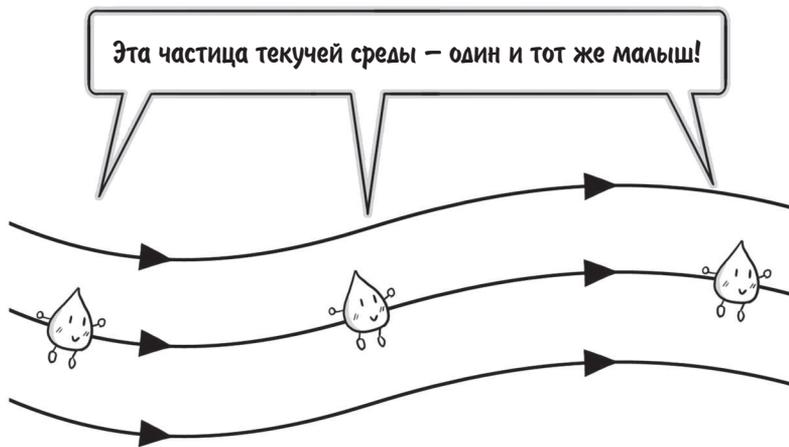


💧 Преследовать? Или поджидать? (Метод Лагранжа и метод Эйлера)



ИТАК, ЗДЕСЬ Я ПОЗНАКОМЛЮ ВАС С ДВУМЯ МЕТОДАМИ НАБЛЮДЕНИЯ ЗА ДВИЖЕНИЕМ ТЕКУЧЕЙ СРЕДЫ. ЭТО МЕТОД ЛАГРАНЖА И МЕТОД ЭЙЛЕРА.

ДЛЯ НАБЛЮДЕНИЯ ЗА ДВИЖЕНИЕМ ТЕКУЧЕЙ СРЕДЫ НЕОБХОДИМО НАБЛЮДАТЬ ЗА МАЛЫШАМИ - ЧАСТИЦАМИ ТЕКУЧЕЙ СРЕДЫ. РАССМОТРИМ МЕТОДЫ ЭТОГО НАБЛЮДЕНИЯ И РАЗЛИЧИЯ МЕЖДУ НИМИ.



■ Метод Лагранжа



В "МЕТОДЕ ЛАГРАНЖА" НАБЛЮДЕНИЕ ПРОВОДЯТ, ВСЁ ВРЕМЯ ПРЕСЛЕДУЯ ОДНОГО И ТОГО ЖЕ МАЛЫША-ЧАСТИЦУ ТЕКУЧЕЙ СРЕДЫ.



Ай-яй-яй!
ЭТО ЖЕ ПОХОЖЕ НА ДЕЙСТВИЯ МАНЬЯКА-ПЕДОФИЛА!

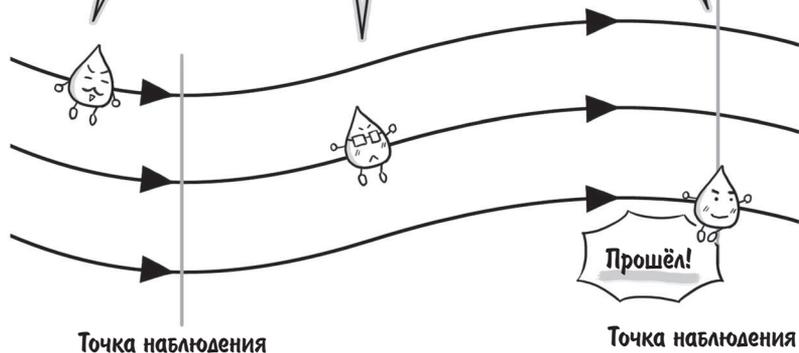


НУ ЧТО ТЫ! УМЕСТНО ЛИ ПОДОБНОЕ СРАВНЕНИЕ?



МОЖНО ПРИВЕСТИ БОЛЕЕ ПОДХОДЯЩЕЕ СРАВНЕНИЕ - ЭТО КАК ЕСЛИ ВЫ ВСЁ ВРЕМЯ БЕЖИТЕ ВМЕСТЕ С ОДНИМ МАРАФОНЦЕМ И НАБЛЮДАЕТЕ ЗА НИМ.

Эти частицы текучей среды – разные малыши!



■ Метод Эйлера



С ДРУГОЙ СТОРОНЫ, В "МЕТОДЕ ЭЙЛЕРА" ВСЁ ВРЕМЯ НАБЛЮДАЮТ ЗА МАЛЫШАМИ-ЧАСТИЦАМИ ТЕКУЧЕЙ СРЕДЫ, ПРОХОДЯЩИМИ МИМО ОДНОГО НАБЛЮДАТЕЛЬНОГО ПУНКТА.



Ай-яй-яй! ПРЯМ КАК ДРУГОЙ МАНЬЯК-ПЕДОФИЛ, КОТОРЫЙ СПРЯТАЛСЯ РЯДОМ С ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ СТАНЦИЕЙ И ПРИСТАЛЬНО РАЗГЛЯДЫВАЕТ ПРОХОДЯЩИХ МИМО ДЕТЕЙ.



А НЕЛЬЗЯ ЛИ ПРИВЕСТИ БОЛЕЕ ПОДХОДЯЩИЙ ПРИМЕР?



НУ, ЭТО КАК ЕСЛИ ВЫ НАБЛЮДАЕТЕ ЗА БЕГУЩИМИ МАРАФОН СПОРТСМЕНАМИ ИЗ ОДНОГО НАБЛЮДАТЕЛЬНОГО ПУНКТА.

И такая линия, и вот такая линия (Линии тока, траектории тока и трубки тока)



ТЕПЕРЬ, КОГДА ВЫ ПОДРУЖИЛИСЬ С МАЛЫШАМИ-ЧАСТИЦАМИ ТЕКУЧЕЙ СРЕДЫ, Я РАССКАЖУ ТАКЖЕ О "ЛИНИЯХ ТОКА", "ТРАЕКТОРИЯХ ТОКА" И "ТРУБКАХ ТОКА". ЗАКРОЙТЕ ГЛАЗА НА СЕКУНДУ.

МАЛЫШИ-ЧАСТИЦЫ ТЕКУЧЕЙ СРЕДЫ ТЕКУТ И ДВИЖУТСЯ. ПУСТЬ В ТОТ МОМЕНТ, КОГДА ВЫ ОТКРЫЛИ ГЛАЗА, 5 МАЛЫШЕЙ (А - Е) ПРЕБЫВАЮТ В ПРОСТРАНСТВЕ ТАК, КАК ПОКАЗАНО НА РИСУНКЕ НИЖЕ, И СОБИРАЮТСЯ ДВИГАТЬСЯ В НАПРАВЛЕНИЯХ, УКАЗАННЫХ СТРЕЛКАМИ.

Малыши-частицы текучей среды

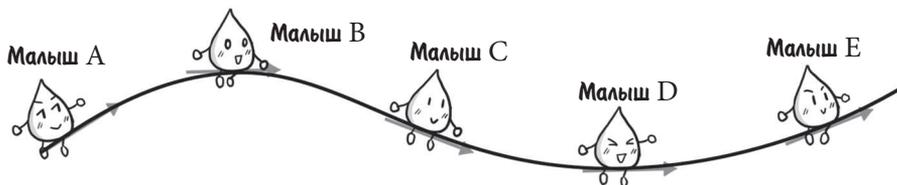


ПОПРОБУЕМ СОЕДИНИТЬ СТРЕЛКИ ВСЕХ МАЛЫШЕЙ С ПОМОЩЬЮ ПЛАВНОЙ ЛИНИИ.



ТАК... ПОЛУЧИТСЯ ЧТО-ТО В ЭТОМ РОДЕ?

Малыши-частицы текучей среды



ДА. ЕСЛИ ОЧЕНЬ СИЛЬНО УПРОЩАТЬ, ТО ЭТА СОЕДИНИТЕЛЬНАЯ ЛИНИЯ ЯВЛЯЕТСЯ "ЛИНИЕЙ ТОКА". С ПОМОЩЬЮ ЭТОЙ ЛИНИИ ЛЕГЧЕ ПРЕДСТАВЛЯТЬ СЕБЕ ТЕЧЕНИЕ, НАПРИМЕР, МЕЖДУ МАЛЫШАМИ А И В, ИЛИ ЖЕ ВСЁ ТЕЧЕНИЕ В ЦЕЛОМ, НЕ ТАК ЛИ?



УГУ. ТО ЕСТЬ, ЕСЛИ НАЧЕРТИТЬ КРИВУЮ ТАК, ЧТОБЫ ВЕКТОРЫ СКОРОСТИ БЫЛИ НАПРАВЛЕННЫ ПО КАСАТЕЛЬНЫМ К НЕЙ, ТО ЭТО БУДЕТ ЛИНИЯ ТОКА, ДА?



ТЕПЕРЬ Я РАССКАЖУ О "ТРАЕКТОРИЯХ ТОКА", КОТОРЫЕ ЧАСТО ПУТАЮТ С ЛИНИЯМИ ТОКА. ЗДЕСЬ МЫ ВСЁ ВРЕМЯ НАБЛЮДАЕМ ЗА ОДНИМ МАЛЫШОМ-ЧАСТИЦЕЙ ТЕКУЧЕЙ СРЕДЫ, КАК В ТОЛЬКО ЧТО ОПИСАННОМ МЕТОДЕ ЛАГРАНЖА. ТРАЕКТОРИЯ ТОКА - ЭТО ЛИНИЯ, СОЕДИНЯЮЩАЯ ПОЛОЖЕНИЯ НАБЛЮДАЕМОГО МАЛЫША В РАЗНЫЕ МОМЕНТЫ ВРЕМЕНИ.



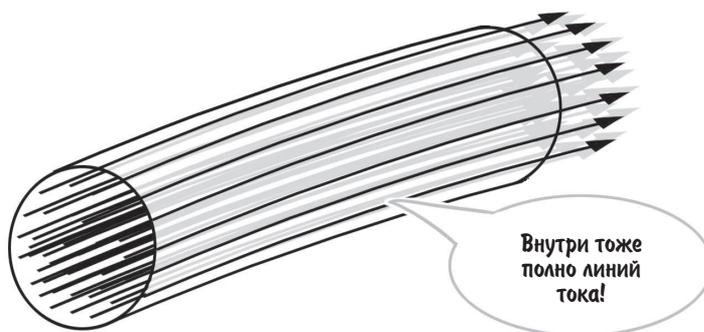
ТО ЕСТЬ ЭТО ЛИНИЯ, ПО КОТОРОЙ МЫ ПРЕСЛЕДОВАЛИ ТОЛЬКО ОДНОГО МАЛЫША А, ПРАВИЛЬНО?



ЛИНИИ ТОКА И ТРАЕКТОРИИ ТОКА СОВПАДАЮТ, ЕСЛИ ТЕЧЕНИЕ СТАЦИОНАРНОЕ, И НЕ СОВПАДАЮТ, ЕСЛИ ОНО НЕСТАЦИОНАРНОЕ.



ДАЛЕЕ, ЕСЛИ МЫ СВЯЖЕМ НЕКОТОРОЕ КОЛИЧЕСТВО ЛИНИЙ ТОКА (НО НЕ ТРАЕКТОРИЙ ТОКА) В ОДИН ПУЧОК, ТО ПОЛУЧИМ "ТРУБКУ ТОКА". ЛИНИИ ТОКА В НЕЙ НЕ ПЕРЕСЕКАЮТСЯ ДРУГ С ДРУГОМ.



ЛИНИИ ТОКА, ТРАЕКТОРИИ ТОКА, ТРУБКИ ТОКА... ЗНАЧИТ ВСЁ ЭТО - РАЗНЫЕ ВЕЩИ.



ЛИНИИ ТОКА БУДУТ ОСОБЕННО ЧАСТО ИСПОЛЬЗОВАТЬСЯ В ДАЛЬНЕЙШЕМ РАССКАЗЕ, ПОЭТОМУ ЗАПОМНИТЕ ИХ КАК СЛЕДУЕТ!

Что можно понять, играя с водой

(Силы, действующие на текучую среду)

СКОРОСТЬ И СКОРОСТЬ ТЕКУЧЕЙ СРЕДЫ, ОБЪЁМ И РАСХОД ТЕКУЧЕЙ СРЕДЫ. АА, КЛАССИЧЕСКАЯ МЕХАНИКА И МЕХАНИКА ТЕКУЧИХ СРЕД ДОВОЛЬНО СХОЖИ!

А ЕСТЬ ЧТО-НИБУДЬ ЕЩЁ, В ЧЁМ ОНИ ПОХОЖИ ДРУГ НА ДРУГА?

ЖИМ.
ЖИМ

МОЛОДЕЦ, ЭКИ-САН! ТЫ ОБРАТИЛА ВНИМАНИЕ НА ХОРОШУЮ ВЕЩЬ!

СТАРОСТА! ПОМОГИТЕ МНЕ, ПОЖАЛУЙСТА!

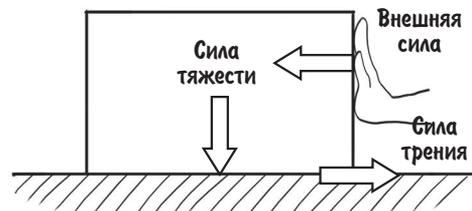
ЭТО ТЕСТО ДЛЯ УАОНА СЕЙЧАС НЕЛЬЗЯ ТАК ОСТАВЛЯТЬ.



ТЕСТО ДЛЯ УАОНА? Я ЕГО НИКОГДА НЕ МЕСИЛА.

ЦТАК, ЭКИ-САН, Я НАЧНУ СВОЙ РАССКАЗ С "МЕХАНИКИ".

В МЕХАНИКЕ СУЩЕСТВУЮТ ТРИ СИЛЫ, ДЕЙСТВУЮЩИЕ НА ТЕЛО.

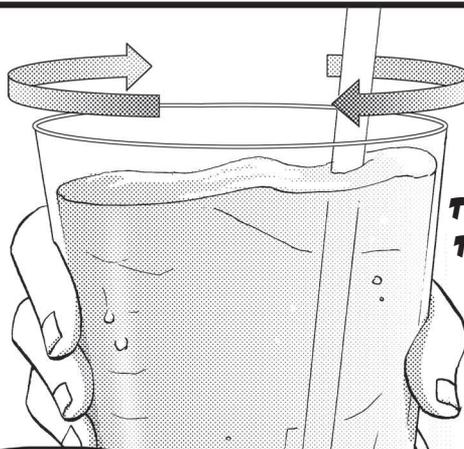


Особенности трёх сил, действующих на тело

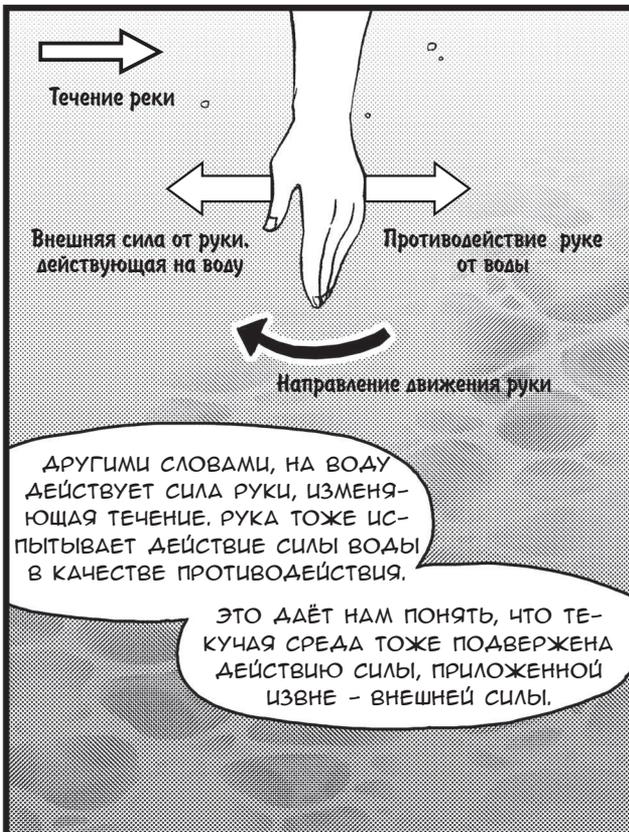
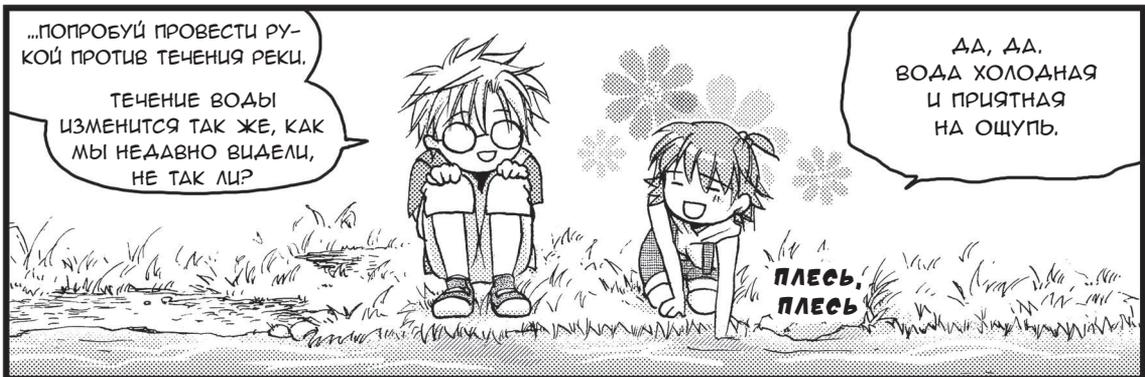
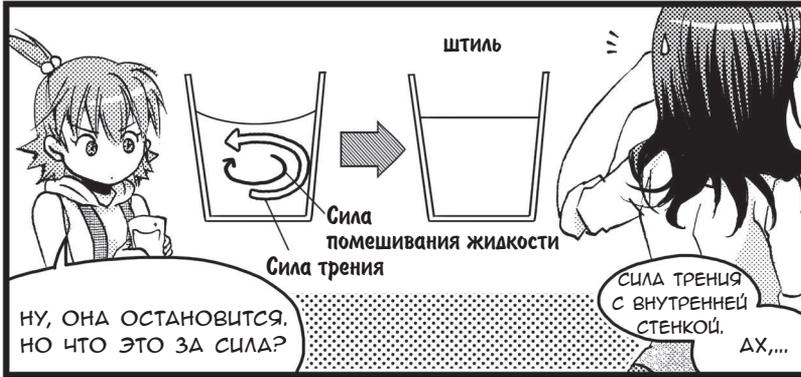
СИЛА ТЯЖЕСТИ, СИЛА ТРЕНИЯ, ВНЕШНЯЯ СИЛА! ТЕСТО ДЛЯ УАОНА РАСПЛАСТЫВАЕТСЯ НА ДОСКЕ, ПОТОМУ ЧТО ВНЕШНЯЯ СИЛА ПРЕВЫШАЕТ СИЛУ ТРЕНИЯ!

ТЕПЕРЬ ПОГОВОРИМ О "ТЕКУЧЕЙ СРЕДЕ".

ВОТ ЭТА ВОДА ТЕЧЁТ ВНИЗ. КАК ТЫ ДУМАЕШЬ, ПОД ДЕЙСТВИЕМ КАКОЙ СИЛЫ ЭТО ПРОИСХОДИТ?



ТЕПЕРЬ, ЕСЛИ МЫ ПОМЕШАЕМ ВОДУ В ЭТОМ СТАКАНЕ И ОСТАВИМ ВСЁ КАК ЕСТЬ...





ЭТО ВЕДЬ ТЕ САМЫЕ ТРИ СИЛЫ,
ДЕЙСТВУЮЩИЕ НА ТЕЛО!

НА САМОМ ДЕЛЕ,
В ОСНОВЕ МЕХАНИКИ ТЕКУЧИХ
СРЕД ЛЕЖИТ КЛАССИЧЕСКАЯ
МЕХАНИКА. ВРОДЕ МЫ УЖЕ
ОБ ЭТОМ ГОВОРИЛИ.

КРОМЕ ТОГО,
ЕСТЬ ЕЩЁ СИЛА ДАВЛЕНИЯ, ДЕЙ-
СТВУЮЩАЯ НА ПОВЕРХНОСТЬ ПЕРПЕН-
ДИКУЛЯРНО ЕЙ; САВИГАЮЩАЯ СИЛА.
(ПОДРОБНО СМ. СТР. 63)

ПОДОБНЫЕ СИЛЫ,
ДЕЙСТВУЮЩИЕ НА ТЕЛО,
СУЩЕСТВУЮТ ТАКЖЕ ВНУТРИ
ТЕКУЩЕЙ СРЕДЫ.



ПОДУМАТЬ ТОЛЬКО!
И В ТЕЛАХ, И В ТЕКУЧИХ СРЕДАХ
ДЕЙСТВУЮТ ПОХОЖИЕ СИЛЫ.
И ЧТО ИЗ ЭТОГО
СЛЕДУЕТ?

А ВОТ
ЧТО!



ЭТО ОЗНАЧАЕТ, ЧТО
РАЗНООБРАЗНЫЕ ЗАКО-
НЫ МЕХАНИКИ ПРИМЕ-
НИМЫ ТАКЖЕ И К МЕ-
ХАНИКЕ ТЕКУЧИХ СРЕД.

ЗАКОН СОХРАНЕНИЯ МАССЫ, ЗАКОН
СОХРАНЕНИЯ ЭНЕРГИИ, ЗАКОН
СОХРАНЕНИЯ ИМПУЛЬСА. КАК ЧЛЕН
ФИЗИЧЕСКОГО КРУЖКА, ТЫ НАВЕР-
НО ХОТЯ БЫ РАЗ СЛЫШАЛА О НИХ?



ЗА...
ЗАКОНЫ?

ВУМ,
ВУМ

НЕ ВОЛНУЙСЯ,
ЭКИ-САН.



Я ПОТОМ ОБСТОЯТЕЛЬНО
ОПИШУ ВАЖНЫЕ ЗАКОНЫ
МЕХАНИКИ ТЕКУЧИХ СРЕД!

ДАВАЙ
СТАРАТЬСЯ
ВМЕСТЕ!

СИРАЦИ, НА ТЕБЯ
МОЖНО ПОЛОЖИТЬСЯ!
СПАСИБО!



ТЕПЕРЬ НАДО
ПОДОЖДАТЬ, ЧТОБЫ
ТЕСТО ДЛЯ УДАОНА
ПОДОШЛО! К КОНЦУ
НАШЕГО РАЗГОВОРА
БУДЕТ В САМЫЙ РАЗ!

АА, НАСТОЯЩИЙ
ЛЮБИТЕЛЬ ГОТОВКИ.

☹ Попробуем сдвинуть колоду карт (Сдвигательная сила)



ПОСЛУШАЙ, СИРАЦСИ. ТЫ ТОЛЬКО ЧТО ГОВОРИЛ О "СДВИГАЮЩЕЙ СИЛЕ", НО Я НЕ СЛЫШАЛА О НЕЙ, КОГДА МЫ ИЗУЧАЛИ МЕХАНИКУ НА УРОКАХ ФИЗИКИ. ЧТО ЖЕ ЭТО ЗА СИЛА?



СДВИГАЮЩАЯ СИЛА – ЭТО СИЛА, ВЫЗЫВАЮЩАЯ СДВИГ. ОНА ДЕЙСТВУЕТ КАК В ТЕЛАХ, ТАК И ВНУТРИ ТЕКУЧИХ СРЕД.



СДВИГ – МАА, ЭТО ЧТО-ТО ДЛЯ МЕНЯ НЕПОНЯТНОЕ.



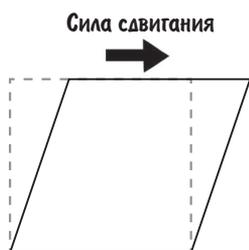
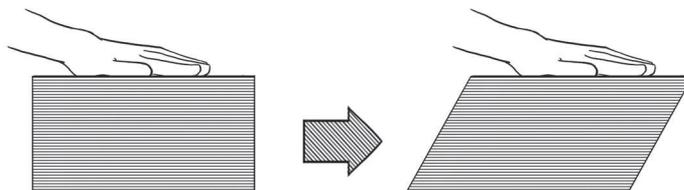
ВОТ У НАС ЕСТЬ КОЛОДА КАРТ. ЕСЛИ ПОЛОЖИТЬ РУКУ НА ВЕРХНЮЮ КАРТУ И ПОПРОБОВАТЬ СДВИНУТЬ ЕЁ. СМОТРИТЕ, ОНА НЕ ТОЛЬКО СДВИНУЛАСЬ САМА, НО УВЛЕКЛА ЗА СОБОЙ КАРТЫ, ЛЕЖАЩИЕ ПОД НЕЙ.



СИЛА, КОТОРАЯ ВОЗНИКАЕТ ВНУТРИ И ВЫЗЫВАЕТ СДВИГ, И ЯВЛЯЕТСЯ СДВИГАЮЩЕЙ СИЛОЙ.



УГУ. ЭТО СТАНЕТ ПОНЯТНЕЕ, ЕСЛИ ПОСМОТРЕТЬ НА КОЛОДУ СБОКУ. ВСЯ КОЛОДА, УВЛЕКАЕМАЯ СИЛОЙ СДВИГАНИЯ, ПРИНИМАЕТ ФОРМУ ПАРАММЕЛОГРАММА.

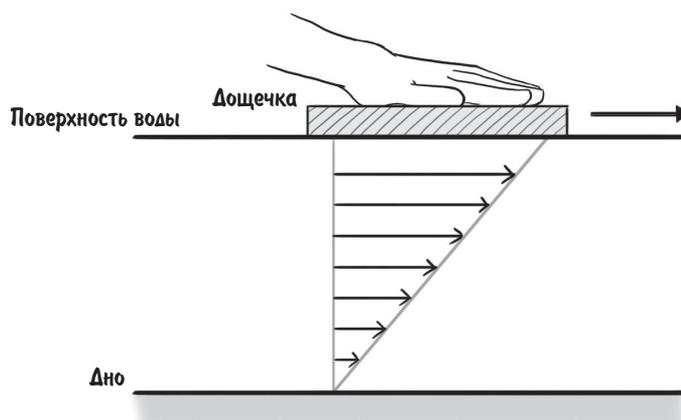


Это - деформация сдвига!



ТЕПЕРЬ ПОПРОБУЕМ ПРИМЕНИТЬ ЭТО К ТЕКУЧЕЙ СРЕДЕ. ПОЛОЖИМ НА ПОВЕРХНОСТЬ ВОДЫ В РЕЗЕРВУАРЕ ДОЩЕЧКУ И ПОПРОБУЕМ СДВИНУТЬ ЕЁ.

ЕСЛИ СМОТРЕТЬ НА РЕЗЕРВУАР СБОКУ, ТО РАСПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТЕЙ И БУДЕТ ИМЕТЬ СЛЕДУЮЩИЙ ВИД.





ПОНЯТНО. НИЖНИЕ СЛОИ, УВЛЕКАЕМЫЕ ВЕРХНИМИ, ПОСТЕПЕННО СДВИГАЮТСЯ, ПРИ ЭТОМ ГЛУБИНА ОТ ПОВЕРХНОСТИ ВОДЫ ВЛИЯЕТ НА СКОРОСТЬ ТЕКУЧЕЙ СРЕДЫ.



А ВОЗНИКАЮЩАЯ ПРИ ЭТОМ СИЛА И ЯВЛЯЕТСЯ СДВИГАЮЩЕЙ СИЛОЙ!



- Распределение скоростей текучей среды под поверхностью воды при движении на поверхности



ЭТОТ РИСУНОК ПОДЫТОЖИВАЕТ СКАЗАННОЕ. ГРАФИКИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СКОРОСТЕЙ ТЕКУЧЕЙ СРЕДЫ БУДУТ ЧАСТО ИСПОЛЬЗОВАТЬСЯ В МОЁМ ДАЛЬНЕЙШЕМ РАССКАЗЕ, ПОЭТОМУ ПРИВЫКНИТЕ К НИМ, ПОЖАЛУЙСТА.

КРОМЕ ТОГО, ВОЗНИКНОВЕНИЕ СДВИГАЮЩЕЙ СИЛЫ ТЕКУЧЕЙ СРЕДЫ ОСНОВАНО НА СИЛЕ ВЯЗКОСТИ. ПОЗЖЕ Я ПОДРОБНО РАССКАЖУ ВАМ ПРО ВЯЗКОСТЬ И СИЛУ ВЯЗКОСТИ. (ПРО ВЯЗКОСТЬ СМ. НА СТР.98)



ХОРОШО!

2. УРАВНЕНИЕ НЕРАЗРЫВНОСТИ

☹️ Похищения призраками не происходит?!
(Закон сохранения массы)



ПОДОЖДИТЕ МИНУТКУ

ХЕ-ХЕ-ХЕ,
ЛАПША УАОН.

ЖАУ
С НЕТЕРПЕНИЕМ



ОДНАКО ЧТО-ТО
МНЕ НЕ ВЕСЕЛО.

ВСЯКИЕ ТАМ ЗАКОНЫ
- ЭТО МОЁ СЛАБОЕ
МЕСТО.

ХВАТИТ ИГРАТЬСЯ, ЭКИ.

ДАЙ МНЕ
ПОМЫТЬ РУКИ.



ШЛАНГ?
ЭТО ХОРОШО.

ОН ПОМОЖЕТ МНЕ ОБЪ-
ЯСНИТЬ ЗАКОН СОХРАНЕ-
НИЯ МАССЫ ТЕКУЧЕЙ
СРЕДЫ.

ЗАКОН СОХРАНЕНИЯ
МАССЫ?



НАПРИМЕР, ВОДА,
КОТОРАЯ ВОШЛА
ИЗ КРАНА В ШЛАНГ,
ВЫИДЕТ ИЗ ДРУГОГО
ЕГО КОНЦА,
НЕ ТАК ЛИ?

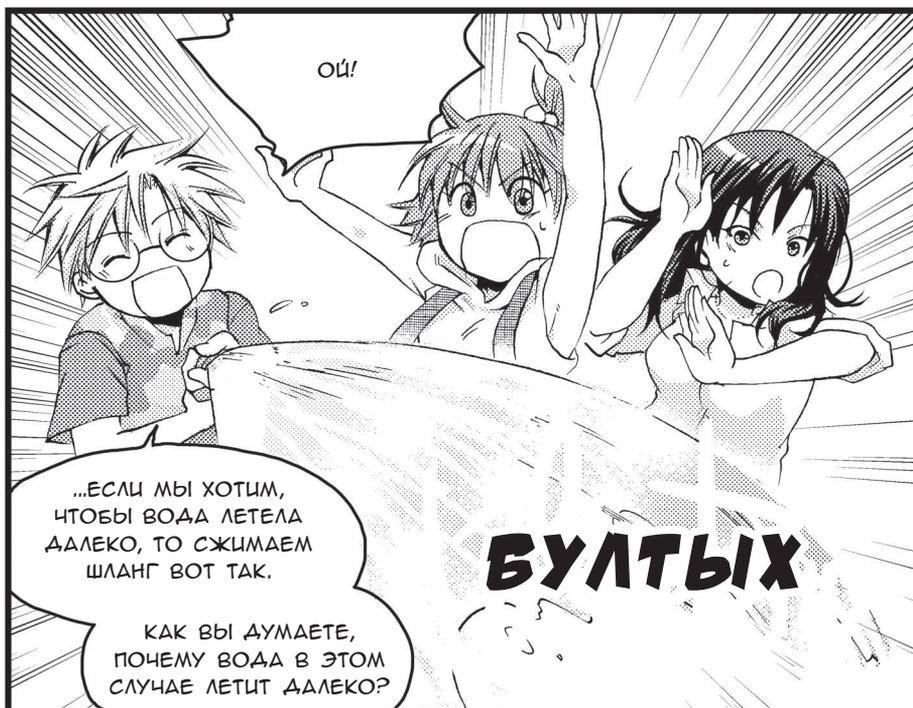
ПРИ ЭТОМ РАСХОД ТЕКУЧЕЙ СРЕДЫ
(СОБЪЁМ ТЕКУЧЕЙ СРЕДЫ, ПРОХОДЯЩИЙ
ЧЕРЕЗ ПОПЕРЕЧНОЕ СЕЧЕНИЕ ШЛАНГА В
ЕДИНИЦУ ВРЕМЕНИ) НА ВЫХОДЕ ШЛАНГА
БУДЕТ ТОЧНО ТАКИМ ЖЕ, КАКИМ
ОН БЫЛ НА ЕГО ВХОДЕ.



Малыш-частица
текучей среды А,
входящий в шланг

Малыш-частица
текучей среды А,
выходящий из шланга

ДРУГИМИ СЛОВАМИ, МАЛЫШ-
ЧАСТИЦА ТЕКУЧЕЙ СРЕДЫ А,
ВОШЕДШИЙ В ШЛАНГ, КОГДА-
НИБУДЬ ВЫИДЕТ ИЗ НЕГО
НАРУЖУ.



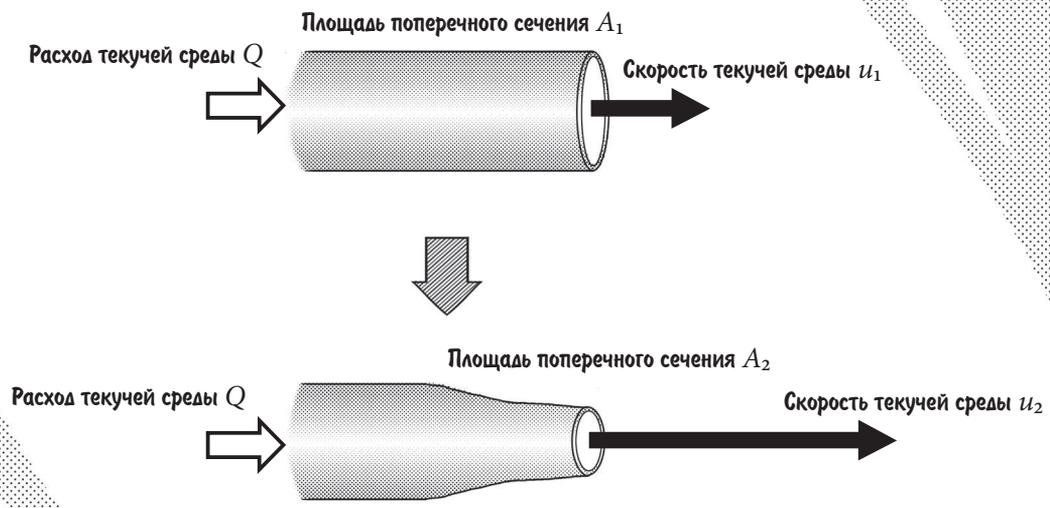
НЕ ЗНАЮ, ЧТО И СКАЗАТЬ. ЭТО ТАК ЕСТЕСТВЕННО.

А! НАВЕРНОЕ, ДЕЛО В ЭНЕРГИИ РУК?!



РАСХОД ТЕКУЧЕЙ СРЕДЫ Q В ШЛАНГЕ С ПЕРВОНАЧАЛЬНОЙ ПЛОЩАДЬЮ ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ A_1 ОСТАНЕТСЯ ТАКИМ ЖЕ И ПОСЛЕ УМЕНЬШЕНИЯ ПЛОЩАДИ ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ ДО A_2 .

ПО ФОРМУЛЕ $Q = Au$, ТАК КАК $A_1 > A_2$, СЛЕДОВАТЕЛЬНО $u_1 < u_2$.



Из $A_1 > A_2$ следует, что $u_1 < u_2$

(подробности см. на стр. 70)

АХ ВОТ ОНО ЧТО!
НЕСМОТЯ НА ИЗМЕНЕНИЕ ПЛОЩАДИ ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ ШЛАНГА, РАСХОД ТЕКУЧЕЙ СРЕДЫ НА ВЫХОДЕ ИЗ ВОДОПРОВОДНОГО КРАНА ОСТАЁТСЯ РАВНЫМ РАСХОДУ ТЕКУЧЕЙ СРЕДЫ НА ВЫХОДЕ ИЗ ШЛАНГА.

ПЛОЩАДЬ ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ НА ВЫХОДЕ ИЗ ШЛАНГА УМЕНЬШИЛАСЬ, ПОЭТОМУ СКОРОСТЬ ВЫХОДА ВОДЫ ИЗ ШЛАНГА ДОЛЖНА БЫЛА ВОЗРАСТИ. ИНАЧЕ РАСХОД ТЕКУЧЕЙ СРЕДЫ НЕ БЫЛ БЫ ПОСТОЯНЕН.

ВАМ



Расход теку-
чей среды

Первоначальная скорость
текучей среды

Скорость текущей
среды после
изменения

$$Q = A_1 u_1 = A_2 u_2$$

Первоначальная
площадь поперечного
сечения шланга

Уменьшенная площадь
поперечного сечения
шланга

В ВИДЕ ФОРМУЛЫ
"УРАВНЕНИЕ НЕРАЗРЫВНОСТИ"
ВЫГЛЯДИТ ВОТ ТАК.

ВЗГЛЯНУВ НА ЭТО УРАВНЕНИЕ,
ВЫ, КОНЕЧНО ЖЕ, ПОЙМЁТЕ, ЧТО ЕСЛИ
РАСХОД ТЕКУЧЕЙ СРЕДЫ ПОСТОЯНЕН,
ТО ПРИ УМЕНЬШЕНИИ ПЛОЩАДИ ПОПЕ-
РЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ СКОРОСТЬ ТЕКУ-
ЧЕЙ СРЕДЫ БУДЕТ УВЕЛИЧИВАТЬСЯ.

ЗНАЧИТ, ЭТО "УРАВНЕ-
НИЕ НЕРАЗРЫВНОСТИ"
ЯВЛЯЕТСЯ ФОРМУЛЬНЫМ
ВЫРАЖЕНИЕМ ЗАКОНА
СОХРАНЕНИЯ МАССЫ!

ЗДЕСЬ НЕОБХОДИМО ОБРАТИТЬ
ВНИМАНИЕ НА 3 МОМЕНТА!
ЭТО УРАВНЕНИЕ НЕРАЗРЫВНОСТИ
ВЕРНО ТОЛЬКО:

- 1) ДЛЯ СТАЦИОНАРНОГО ТЕЧЕНИЯ,
- 2) ПРИ ПОСТОЯННОЙ ПЛОТНОСТИ,
- 3) ВОДОЛЬ ЛИНИЙ ТОКА.

(*о линиях тока см. на стр.58)

Плотность
постоянна

Выполняется
вдоль линий
тока

С течением
времени масса
не изменяется -
стационарное
течение

Расход
текучей
среды
на входе Q_1

ЗООМ!

Если течение
стационарно, то $Q_1 = Q_2$

Количество малышей-частиц
текучей среды в единице
объёма одинаково =>
Плотность постоянна

Расход
текучей
среды
на выходе Q_2

В ВИДЕ СХЕМЫ
ЭТО ВЫГЛЯДИТ
ВОТ ТАК.

КАК ПРОСТО.
Я ДУМАЛА, ЧТО
БУДЕТ СЛОЖНЕЕ.

ЭТО ВЫГЛЯДЕЛО
СЛОЖНО ИЗ-ЗА ВСЯКИХ
ТАМ A И u !

НУ И ВРЕДИНА
ТЫ, СИРАУСИ!

ЖИМ

ЭТО ТЫ ПРО
СЕБЯ СКАЖИ.

ВОТ!

КАП, КАП



Об уравнении неразрывности

Итак, здесь я подробно объясню уравнение неразрывности.

В чём причина того, что если расход текучей среды Q одинаков, то при уменьшении площади поперечного сечения течения A увеличивается скорость текучей среды u ? Пусть по шлангу с площадью поперечного сечения A протекает вода со скоростью текучей среды u , как показано на рис. ниже. Найдём расход текучей среды для этого случая.



Объём воды V , который выходит из этого шланга за время t , можно рассчитать по следующей формуле.

$$V = uAt$$

Скорость текучей среды \times Площадь поперечного сечения \times Время
 Расход текучей среды Q (объём в единицу времени)

Следовательно, чтобы найти объём, вытекающий за единицу времени (за 1 с), то есть расход текучей среды Q , достаточно поделить объём V на время t .

$$Q = \frac{V}{t} = uA$$

Расход текучей среды \quad Скорость текучей среды \times Площадь поперечного сечения

Кроме того, если известен расход текучей среды Q для какого-либо течения, то, зная площадь поперечного сечения A , мы можем найти скорость текучей среды u по формуле $u = Q/A$ (Скорость текучей среды = Расход текучей среды \div Площадь поперечного сечения).

Внимательно посмотрите на эту формулу. Видите ли вы, что u и A обратно пропорциональны друг другу, если Q не меняется.

Таким образом, если расход текучей среды Q одинаков, то при уменьшении площади поперечного сечения течения A увеличивается скорость текучей среды u .

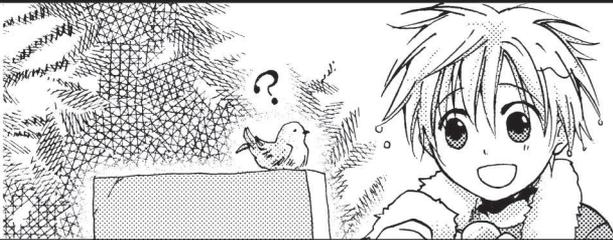
3. ТЕОРЕМА БЕРНУЛЛИ

☹️ Покатаемся на американских горках! (Закон сохранения энергии тела)

ИТАК, ПРЕЖДЕ ЧЕМ НАЧАТЬ ОБЪЯСНЕНИЕ ТЕОРЕМЫ БЕРНУЛЛИ, КОТОРАЯ ЯВЛЯЕТСЯ "ЗАКОНОМ СОХРАНЕНИЯ ЭНЕРГИИ ТЕКУЧЕЙ СРЕДЫ",...

...ОСВЕЖИМ ЗНАНИЯ О "ЗАКОНЕ СОХРАНЕНИЯ ЭНЕРГИИ ТЕЛА".

Эй, сираиси! МЫ ЗАДЕСЬ.



ВООБЩЕ-ТО ЗАКОН СОХРАНЕНИЯ ЭНЕРГИИ ТЕЛА ГЛАСИТ, ЧТО "СУММА ЭНЕРГИИ ДВИЖЕНИЯ* И ЭНЕРГИИ ПОЛОЖЕНИЯ** ВСЕГДА ОСТАЁТСЯ ПОСТОЯННОЙ".

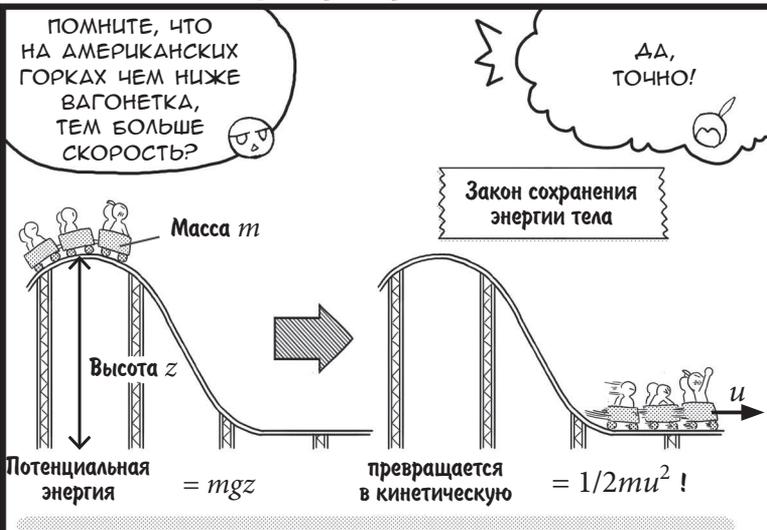
ДВИЖЕНИЯ? ПОЛОЖЕНИЯ?

ЭКИ, ВСПОМНИ ПРО СВОИ ЛЮБИМЫЕ АМЕРИКАНСКИЕ ГОРКИ.

В положение на старт, внимание, марш!

* т.е. кинетической энергии

** т.е. потенциальной энергии (прим. перев.)



ТАК КАК СУММА КИНЕТИЧЕСКОЙ И ПОТЕНЦИАЛЬНОЙ ЭНЕРГИЙ СОХРАНЯЕТСЯ, ТО

$$1/2mv^2 + mgz = \text{const}$$

ЭТО ХОРОШИЙ ПРИМЕР, ПОКАЗЫВАЮЩИЙ, ЧТО ЕСЛИ ПОТЕНЦИАЛЬНАЯ ЭНЕРГИЯ УМЕНЬШАЕТСЯ, ТО КИНЕТИЧЕСКАЯ - УВЕЛИЧИВАЕТСЯ.

ДАЛЕЕ, У ТЕКУЧЕЙ СРЕДЫ, КРОМЕ ЭНЕРГИЙ ДВИЖЕНИЯ И ПОЛОЖЕНИЯ, ЕСТЬ ЕЩЁ ОДНА ЭНЕРГИЯ - "ЭНЕРГИЯ ДАВЛЕНИЯ"!

НОВИНКА!

Давление

ОЙ, ЧТО ЭТО?! ЭТОГО НЕ БЫЛО В ЗАКОНЕ СОХРАНЕНИЯ ЭНЕРГИИ ТЕЛА.

Прогоуляемся вдоль линии тока
(Закон сохранения энергии текучей среды, теорема Бернулли)



ИТАК, ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ НА ВОДУ, НАХОДЯЩУЮСЯ В ЭТОЙ КАНИСТРЕ.

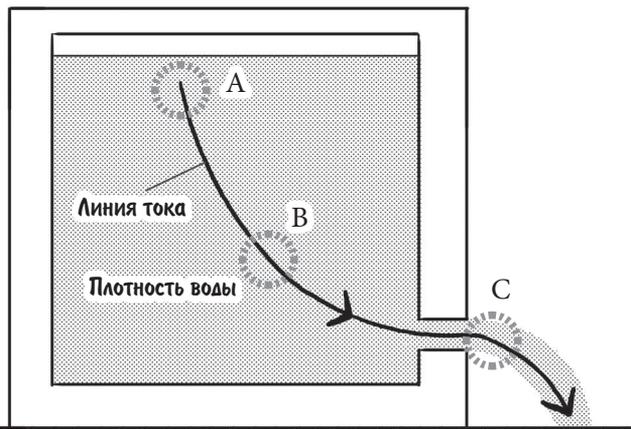
ЕСЛИ ПОВЕРНУТЬ КРАН, ТО ВОДА ПОЛБЁТСЯ СИЛЬНЫМ ПОТОКОМ.

А КАК ПРИ ЭТОМ ИЗМЕНЯЕТСЯ ЭНЕРГИЯ ТЕКУЧЕЙ СРЕДЫ, НАХОДЯЩЕЙСЯ В КАНИСТРЕ? ДАВАЙТЕ ИЗУЧИМ ЭТО, ПРОЙДЯСЬ ВДОЛЬ ЛИНИИ ТОКА. (О ЛИНИЯХ ТОКА СМ. НА СТР.58)



ВОТ СХЕМАТИЧЕСКОЕ ИЗОБРАЖЕНИЕ КАНИСТРЫ С ВОДОЙ ПРИ ВИДЕ СБОКУ.

КАК ВЫ ДУМАЕТЕ, ЧЕМУ РАВНЫ ЭНЕРГИИ В ТОЧКАХ А, В И С?



ТОЧКА А РАСПОЛОЖЕНА ВЫСОКО, ЗНАЧИТ В НЕЙ, НАВЕРНОЕ, БОЛЬШАЯ ПОТЕНЦИАЛЬНАЯ ЭНЕРГИЯ.

ТОЧКА С РАСПОЛОЖЕНА НИЗКО, И СКОРОСТЬ ТАМ ТОЖЕ ЕСТЬ. НАВЕРНОЕ, В НЕЙ БОЛЬШАЯ КИНЕТИЧЕСКАЯ ЭНЕРГИЯ?

ИМЕННО ТАК! ДАЛЕЕ, Я ХОЧУ, ЧТОБЫ ВЫ ОБРАТИЛИ ОСОБОЕ ВНИМАНИЕ НА ТОЧКУ В!

В ЭТОЙ ТОЧКЕ УВЕЛИЧЕНА ГЛУБИНА И ВЫСОКО ДАВЛЕНИЕ, ТО ЕСТЬ ТАМ ЕСТЬ БОЛЬШАЯ ЭНЕРГИЯ ДАВЛЕНИЯ.



ПОНЯТНО! ВЕДЬ ГЛУБОКО ПОД ВОДОЙ ВЫСОКОЕ ДАВЛЕНИЕ!

$$\text{Энергия тела} = \text{Энергия движения} + \text{Энергия положения}$$

Постоянна

ИТАК, В ЗАКОНЕ СОХРАНЕНИЯ ЭНЕРГИИ ТОЛЬКО ЧТО УПОМЯНУТЫХ АМЕРИКАНСКИХ ГОРОК:

(ЭНЕРГИЯ ТЕЛА) = (КИНЕТИЧЕСКАЯ ЭНЕРГИЯ) + (ПОТЕНЦИАЛЬНАЯ ЭНЕРГИЯ) БЫЛА ПОСТОЯННА.

НА САМОМ ДЕЛЕ, ДЛЯ ТЕКУЧЕЙ СРЕДЫ ТОЖЕ МОЖНО СОСТАВИТЬ ПОХОЖЕЕ ВЫРАЖЕНИЕ (ЭНЕРГИЯ ТЕКУЧЕЙ СРЕДЫ) = (КИНЕТИЧЕСКАЯ ЭНЕРГИЯ) + (ЭНЕРГИЯ ДАВЛЕНИЯ) + (ПОТЕНЦИАЛЬНАЯ ЭНЕРГИЯ), И ЭНЕРГИЯ ТЕКУЧЕЙ СРЕДЫ ПРИ ЭТОМ БУДЕТ ПОСТОЯННА!

НОВИНКА!

$$\text{Энергия текущей среды} = \text{Энергия движения} + \text{Энергия давления} + \text{Потенциальная энергия}$$

Постоянна



ЗДЕСЬ СЛЕДУЕТ ОБРАТИТЬ ВНИМАНИЕ, ЧТО ЗАКОН СОХРАНЕНИЯ ЭНЕРГИИ ВЫПОЛНЯЕТСЯ ВОЛЬ ЛИНИЙ ТОКА.

А-А!



ТО ЕСТЬ В ТОЧКАХ А, В И С СУММАРНАЯ ЭНЕРГИЯ ТЕКУЧЕЙ СРЕДЫ ОДИНАКОВА?

КРОМЕ ТОГО, В СВЯЗИ С ТЕМ, ЧТО ТЕКУЧАЯ СРЕДА НЕ ИМЕЕТ ОПРЕДЕЛЁННОЙ ФОРМЫ, ДЛЯ ВЫРАЖЕНИЯ ЭТИХ ЭНЕРГИЙ ВМЕСТО МАССЫ m ИСПОЛЬЗУЕТСЯ "ПЛОТНОСТЬ ρ ".

ЭКИ-САН, ПОМНИШЬ, ЧТО ТАКОЕ ПЛОТНОСТЬ?

ВОТ ЭТО!

ДА... КАК БЫ СКАЗАТЬ... ЭТО ЧТО-ТО ВРОДЕ МАССЫ ВЕЩЕСТВА ВОТ ТАКОГО РАЗМЕРА!



Определение:
плотность = масса, приходящаяся на единичный объём



ПОДЫТОЖУ
СКАЗАННОЕ
ТОЛЬКО ЧТО.

В ТЕКУЧЕЙ СРЕДЕ НА ЛИНИИ
ТОКА СУММА КИНЕТИЧЕСКОЙ
ЭНЕРГИИ, ЭНЕРГИИ ДАВЛЕНИЯ
И ПОТЕНЦИАЛЬНОЙ ЭНЕРГИИ -
ЭТО ПОСТОЯННАЯ ВЕЛИЧИНА.

ЗНАЧИТ, ЭТО УРАВНЕНИЕ
ВЫРАЖАЕТ ЗАКОН СОХРАНЕНИЯ
ЭНЕРГИИ, ПРИХОДЯЩЕЙСЯ НА ЕДИНИЧНЫЙ
ОБЪЕМ ТЕКУЧЕЙ СРЕДЫ?

ВМЕСТО МАССЫ m ФОРМУЛЫ
ЭНЕРГИИ ТЕЛА ЗАДЕСЬ ИСПОЛЬЗУЕТСЯ
ПЛОТНОСТЬ (МАССА, ПРИХОДЯЩАЯСЯ
НА ЕДИНИЧНЫЙ ОБЪЕМ) ρ .



$$\frac{1}{2} \rho u^2 + p + \rho g z = \text{Константа}$$

Кинетическая
энергия

Энергия
давления

Потенциальная
энергия

ТАК КАК ЕДИНИЦА ИЗМЕРЕНИЯ
ЭНЕРГИИ - ЭТО [ПА], ЭТО
УРАВНЕНИЕ МОЖНО ТАКЖЕ
ЗАПИСАТЬ ВОТ ТАК.

ЭТОТ ЗАКОН НАЗЫВАЕТСЯ
ТЕОРЕМОЙ БЕРНУЛЛИ, А ФОРМУЛА
НАЗЫВАЕТСЯ УРАВНЕНИЕМ
БЕРНУЛЛИ.

$$\frac{1}{2} \rho u^2 + p + \rho g z = E \text{ [Pa]}$$

ЗДЕСЬ ВАЖНО ТО, ЧТО ЭТА
ТЕОРЕМА ВЫПОЛНЯЕТСЯ
ВДОЛЬ ЛИНИИ ТОКА.

Ясно!

ЗАПОМНИТЕ
ЭТО
ХОРОШЕНЬКО!

ПОЗВОЛЮ СЕБЕ НЕМНОЖКО РАЗ-
ВЫТЬ ТЕМУ. ЕСТЬ ТАКАЯ ВЕЩЬ, КАК
УРАВНЕНИЕ ДВИЖЕНИЯ ЭЙЛЕРА,
ЯВЛЯЮЩЕЕСЯ ПРИЛОЖЕНИЕМ
УРАВНЕНИЯ ДВИЖЕНИЯ ТЕЛА ($F=ma$)
К ДВИЖЕНИЮ ТЕКУЧЕЙ СРЕДЫ.

ЕСЛИ ПРОИНТЕГРИРОВАТЬ ЭТО
УРАВНЕНИЕ ДВИЖЕНИЯ
ЭЙЛЕРА ВДОЛЬ ЛИНИИ ТОКА,
ТО МЫ ПОЛУЧИМ УРАВНЕНИЕ
БЕРНУЛЛИ.

УРАВНЕНИЕ БЕРНУЛЛИ БЫЛО
ВЫВЕДЕНО ШВЕЙЦАРСКИМ
МАТЕМАТИКОМ ДАНИЛОМ БЕРНУЛЛИ.
МАТЕМАТИКАМИ БЫЛИ ТАКЖЕ ЕГО
ОТЕЦ И ДЯДЯ, И РАССКАЗЫВАЮТ,
ЧТО РОДНОЙ ОТЕЦ ЗАВИДОВАЛ
ТАЛАНТУ ДАНИЛА.



ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ СВЕДЕНИЯ



О единицах измерения энергии

Давайте здесь проясним вопрос с единицами измерения энергии E [Па]!

Помните, до этого я рассказывал о [Па] как о единице измерения давления p (стр. 19)? Тогда было объяснено, что $[Па] = [Н/м^2]$. Итак, почему же он вдруг стал единицей измерения энергии E ? Чтобы разрешить это сомнение, для начала взгляните на нижеприведённые равенства.

О единице измерения энергии [Па]

$$[Па] = \left[\frac{Н}{м^2} \right] = \left[\frac{Н \times м}{м^3} \right] = \left[\frac{Дж}{м^3} \right]$$



Вот как можно переписать [Па]!

Обозначение [Дж], которое вы, возможно, видите впервые, является единицей измерения энергии. [Дж] поделён на $м^3$, который представляет собой куб со длиной ребра 1 м - куб единичного объёма.

$$[Па] \stackrel{\text{Равно!}}{=} \left[\frac{Дж}{м^3} \right]$$



Другими словами, [Па] выражает энергию, содержащуюся в единичном объёме!

Только что я говорил, что для выражения энергии текучей среды вместо массы m используется плотность, то есть масса единичного объёма (см. стр. 73).

Следовательно, [Па] может быть также единицей измерения энергии.

Наступаем на шланг!

(Отношения между скоростью текучей среды и давлением)



ЧТОБЫ ГЛУБЖЕ ПОНЯТЬ
ТЕОРЕМУ БЕРНУЛЛИ,
ДАВАЙТЕ ПРОВЕДЕМ
ОДИН ОПЫТ.

СЕЙЧАС Я НАСТУПЛЮ
НА СЕРЕДИНУ ЭТОГО
ШЛАНГА,

А ВЫ ВАВОЁМ
НАБЛЮДАЙТЕ,
НЕ ИЗМЕНЯЕТСЯ ЛИ
ТЕЧЕНИЕ НА ВЫХОДЕ
ИЗ НЕГО.



Я НАСТУПИЛ!

ЧТО ТАМ
С ТЕЧЕНИЕМ
ВОДЫ?



ОНО
НЕ ИЗМЕНИЛОСЬ.

А Я ДУМАЛА, ЧТО
СКОРОСТЬ ТЕКУЧЕЙ
СРЕДЫ НА ВЫХОДЕ
ДОЛЖНА ИЗМЕНИТЬСЯ.



ИЗДАВАТЕЛЬСТВО
НАД ШЛАНГОМ!
УЖАСНО!

Ах!

ДА, ЭТО
ХОРОШО!

ХОРОШО?

ЕСЛИ НЫНЕШНЕЕ
СОСТОЯНИЕ ИЗОБРАЗИТЬ
НА СХЕМЕ, ТО ПОЛУ-
ЧИТСЯ СЛЕДУЮЩЕЕ.



Энергия

Скорость текучей среды u

E Суммарная энергия

p Энергия давления

$\frac{1}{2}\rho u^2$ Кинетическая энергия

Здесь шланг сужился из-за того, что я наступил на него ногой.

ЕСЛИ ПРИМЕНИТЬ К ЭТОМУ УРАВНЕНИЮ БЕРНУЛЛИ, ТО МЫ ПОЛУЧИМ СЛЕДУЮЩЕЕ.

ТАК КАК ШЛАНГ ЛЕЖИТ ГОРИЗОНТАЛЬНО, ПОТЕНЦИАЛЬНАЯ ЭНЕРГИЯ НЕ ИЗМЕНЯЕТСЯ, ПОЭТОМУ МЫ ПРИНИМАЕМ $z=0$ И ПОЛУЧАЕМ....

...ЧТО СУММАРНАЯ ЭНЕРГИЯ РАВНА E , ВЕРНО?

$\frac{1}{2}\rho u^2 + p = \text{Константа} = E$

ПРОЩЕ ГОВОРИТЬ, ЭТО СООТВЕТСТВУЕТ УРАВНЕНИЮ НЕРАЗРЫВНОСТИ, КОТОРОЕ Я ОБЪЯСНЯЛ НЕДАВНО.

ТАМ, ГДЕ ПЛОЩАДЬ ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ ШЛАНГА УМЕНЬШЕНА, СКОРОСТЬ ТЕКУЧЕЙ СРЕДЫ УВЕЛИЧИВАЕТСЯ, ТАК КАК РАСХОД ТЕКУЧЕЙ СРЕДЫ ПОСТОЯНЕН. ПРИ ЭТОМ УВЕЛИЧИВАЕТСЯ КИНЕТИЧЕСКАЯ ЭНЕРГИЯ.

ЯСНО, ЯСНО! ВСЁ ТАК ЖЕ, КАК КОГДА ТЫ СЖИМАЛ ШЛАНГ ПАЛЬЦАМИ.

ДА, НЕ ТАК ЛИ?

ДАВАЙТЕ ПОДУМАЕМ ТАКЖЕ ОБ ЭНЕРГИИ ДАВЛЕНИЯ.

ТАК КАК СУММАРНАЯ ЭНЕРГИЯ ПОСТОЯННА, ПРИ УВЕЛИЧЕНИИ КИНЕТИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ ЭНЕРГИЯ ДАВЛЕНИЯ УМЕНЬШАЕТСЯ НА ТАКУЮ ЖЕ ВЕЛИЧИНУ.

СКРЪБ, СКРЪБ

Давление

Движение

Константа

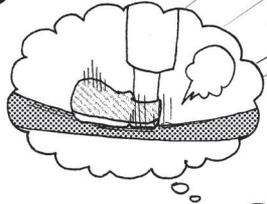
УМЕНЬШАЕТСЯ?

КАК ЭТО ТАК?!
УМЕНЬШАЕТСЯ ДАВЛЕНИЕ?!
Я ЭТОГО НЕ ОЖИДАЛА!

ДА, УДИВИ-
ТЕЛЬНО...!

ИНТУИТИВНО НАМ КАЖЕТСЯ, ЧТО
В СУЖЕННОМ МЕСТЕ ТЕЧЕНИЕ
ЗАТРУДНЕНО, ПОЭТОМУ ДАВЛЕНИЕ
ДОЛЖНО УВЕЛИЧИТЬСЯ...

ОДНАКО НА САМОМ
ДЕЛЕ ДАВЛЕНИЕ
УМЕНЬШАЕТСЯ.



ЭТО ЛЕГКО ПОНЯТЬ
НА СЛЕДУЮЩЕМ
ПРИМЕРЕ!

БАМ

ПУСТЫЕ БАНКИ?
ГДЕ ТЫ ИХ
ДОСТАЛ?

НА САМОМ ДЕЛЕ,
Я ТОЛЬКО ЧТО ТИХОНЬКО
ПОПИЛ СОКА.

ПОПРОБУЙ ДУНУТЬ
С СИЛОЙ В ПРОМЕЖУТОК
МЕЖАУ БАНКАМИ.



ВОТ ТАК,
ЧТО ЛИ?



ФУУУ

ОНИ ПРИЖАЛИСЬ
ДРУГ К ДРУГУ.

БАНКИ ПРИТЯНУЛО
ОДНУ К ДРУГОЙ!



ОЙ!

ВЫДУВАЕМЫЙ ВОЗДУХ ПРИ ПРОХОЖДЕНИИ ЧЕРЕЗ УЗКУЮ ЩЕЛЬ УБЫСТРАЕТСЯ, ЕГО КИНЕТИЧЕСКАЯ ЭНЕРГИЯ УВЕЛИЧИВАЕТСЯ, ПОЭТОМУ ДАВЛЕНИЕ УМЕНЬШАЕТСЯ.

ДВЕ БАНКИ СБЛИЗИЛИСЬ, ПОТОМУ ЧТО НА КАЖДУЮ ИЗ НИХ ПОДЕЙСТВОВАЛА СИЛА, НАПРАВЛЕННАЯ ОТ ИХ ВНЕШНИХ СТОРОН, ГДЕ ДЕЙСТВУЕТ АТМОСФЕРНОЕ ДАВЛЕНИЕ, К ЩЕЛИ, ГДЕ ДАВЛЕНИЕ ПОНИЖЕНО.



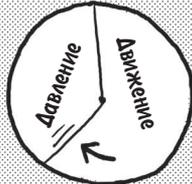
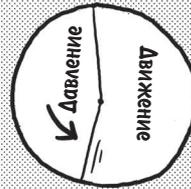
При сужении скорость текучей среды увеличивается, а давление уменьшается



ТЕПЕРЬ, ВОЗВРАЩАЯСЬ К РАЗГОВОРУ О ШЛАНГЕ...

...НА ВЫХОДЕ ИЗ ШЛАНГА ПЛОЩАДЬ ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ УВЕЛИЧИВАЕТСЯ, ПОЭТОМУ СКОРОСТЬ ТЕКУЧЕЙ СРЕДЫ И КИНЕТИЧЕСКАЯ ЭНЕРГИЯ УМЕНЬШАЮТСЯ.

ТЫСК, ТЫСК



ТЫСК, ТЫСК

И, В СООТВЕТСТВИИ С ТЕОРЕМОЙ БЕРНУЛЛИ, ТАК КАК ЭНЕРГИЯ ДАВЛЕНИЯ УВЕЛИЧИЛАСЬ,...

...НА ВЫХОДЕ ИЗ ШЛАНГА НИЧЕГО НЕ ИЗМЕНИЛОСЬ НЕСМОТРИ НА ТО, ЧТО Я НАСТУПИЛ НА ЕГО СЕРЕДИНУ!



Угу



Никак не прилипнут друг к другу.



стук

ПОНЯТНО... ЗНАЧИТ, В КОНЦЕ КОНЦОВ НИЧЕГО НЕ ИЗМЕНИТСЯ? ДА, С ЭТИМ МОЖНО СОГЛАСИТЬСЯ, ТОЛЬКО ЕСЛИ ПРИМЕНИТЬ ЗАКОН...

4. ЗАКОН СОХРАНЕНИЯ ИМПУЛЬСА

Играем с колыбелью Ньютона (Закон сохранения импульса)

И НАКОНЕЦ, ПОСЛЕДНЯЯ
НА СЕГОДНЯ ТЕМА.

Я РАССКАЖУ ВАМ О ЗАКОНЕ
СОХРАНЕНИЯ ИМПУЛЬСА
ДЛЯ ТЕКУЩИХ СРЕД!

У МЕНЯ ЕСТЬ ОДНА ПРОСЬБА!

РАССКАЖИ СНАЧАЛА ОБ ЭТОМ
ИМПУЛЬСЕ ЧЕГО-ТО ДЛЯ
ТВЁРДЫХ ТЕЛ, А УЖ ПОТОМ -
ДЛЯ ТЕКУЩИХ СРЕД.

ШМЭП!

О ЗАКОНЕ
СОХРАНЕНИЯ ИМПУЛЬСА!

Я ПРЕДОПОЛАГАЛ, ЧТО ТЫ ТАК
СКАЖЕШЬ, ПОЭТОМУ
ТЩАТЕЛЬНО ПОДГОТОВИЛСЯ!
СНАЧАЛА Я ОБСТОЯТЕЛЬНО
ОБЪЯСНЮ ЗАКОН СОХРАНЕ-
НИЯ ИМПУЛЬСА ДЛЯ ТВЁРДЫХ
ТЕЛ С ПОМОЩЬЮ ВОТ ЭТОЙ ИГ-
РУШКИ, КОТОРАЯ НАЗЫВАЕТСЯ
КОЛЫБЕЛЬЮ НЬЮТОНА!

ТА-ДАМ

ОГО...! МАЯТНИКИ!
ДА, ТЫ ХОРОШО
ПОДГОТОВИЛСЯ,
СИРАСИ!

НА САМОМ ДЕЛЕ Я...
ПРИВЫК ПЕРЕД СНОМ
ИГРАТЬ С ЭТИМ...
Я ВЗЯЛ ЭТО С СОБОЙ,
ЧТОБЫ У МЕНЯ НЕ БЫЛО
БЕССОННИЦЫ СЕГОДНЯ
ВЕЧЕРОМ.

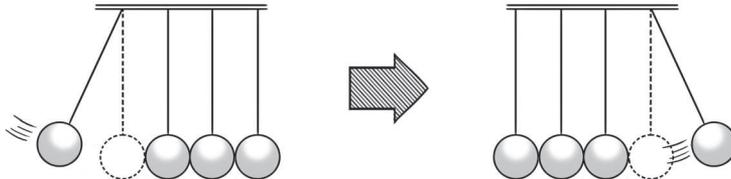
АГА, НАВЕРНОЕ,
БУДЕТ ТРУДНО ЗАСНУТЬ
НА НЕПРИВЫЧНОЙ
ПОДУШКЕ, 'ДА?

И ПОЧЕМУ ВСЕ
В НАШЕМ КРУЖКЕ -
ТАКИЕ ЧУДАКИ...

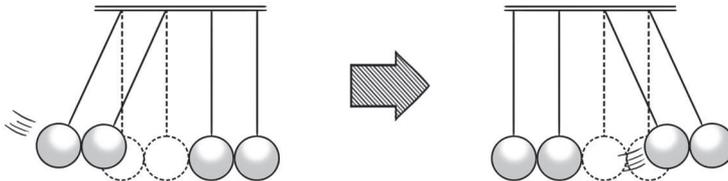
Закон сохранения импульса для колыбели Ньютона



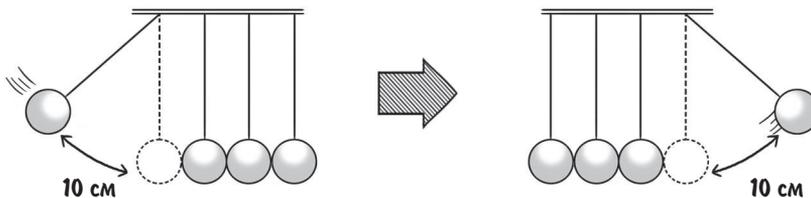
ИТАК, ПОСМОТРИТЕ ВНИМАТЕЛЬНО НА ЭТУ КОЛЫБЕЛЬ НЬЮТОНА. ЕСЛИ МЫ ОТВЕДЕМ И ОТПУСТИМ ОДИН ШАР СЛЕВА, ТО ОТСКОЧИТ ОДИН ШАР СПРАВА. НАЧАЛЬНОЕ ПОЛОЖЕНИЕ ШАРОВ И НИТЕЙ ПОКАЗАНО ПУНКТИРОМ, ПОЛОЖЕНИЕ В НАСТОЯЩИЙ МОМЕНТ - СПЛОШНЫМИ ЛИНИЯМИ.



ЕСЛИ МЫ ОДНОВРЕМЕННО ОТВЕДЕМ И ОТПУСТИМ ДВА ШАРА СЛЕВА, ТО ОТСКОЧАТ ДВА ШАРА СПРАВА.



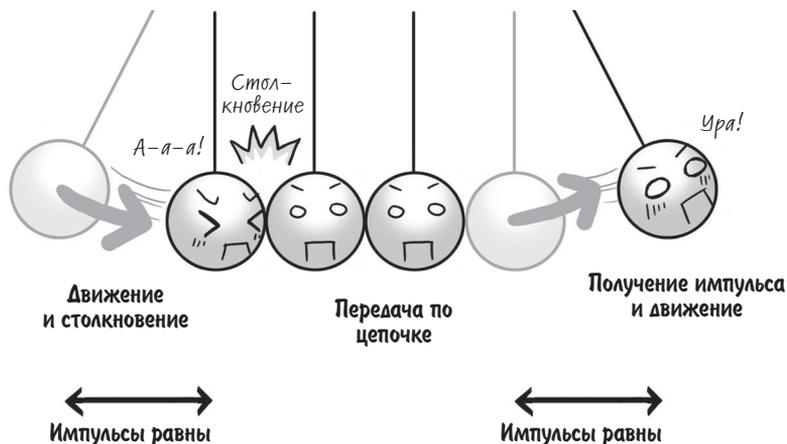
ТАКЖЕ ИНТЕРЕСНО, ЧТО ЕСЛИ МЫ ОТВЕДЕМ ШАР СЛЕВА НА 10 СМ И ОТПУСТИМ ЕГО,...



ОЙ! ШАР СПРАВА ОТСКОЧИЛ ТОЖЕ НА 10 СМ...!



ИТАК, ДВИЖЕНИЯ ШАРОВ, КОТОРЫЕ МЫ ТОЛЬКО ЧТО НАБЛЮДАЛИ, МОЖНО ОБЪЯСНИТЬ СЛЕДУЮЩИМ ОБРАЗОМ.



ЭТО ОЗНАЧАЕТ, ЧТО ПРОИЗВЕДЕНИЕ СКОРОСТИ u_1 В МОМЕНТ ПЕРЕД САМЫМ СТОЛКНОВЕНИЕМ И МАССЫ m ЛЕВОГО ШАРА РАВНО ПРОИЗВЕДЕНИЮ СКОРОСТИ u_2 ПОСЛЕ ОТСКАКИВАНИЯ И МАССЫ m ПРАВОГО ШАРА. ЭТО ПРОИЗВЕДЕНИЕ МАССЫ m И СКОРОСТИ u ШАРА НАЗЫВАЕТСЯ ИМПУЛЬСОМ, ИЛИ КОЛИЧЕСТВОМ ДВИЖЕНИЯ.



ТО ЕСТЬ ЭТО ОЗНАЧАЕТ, ЧТО ИМПУЛЬС ПЕРЕДАЁТСЯ ПО ЦЕПОЧКЕ БЕЗ ИЗМЕНЕНИЙ. И ЭТО НАЗЫВАЕТСЯ "ЗАКОНОМ СОХРАНЕНИЯ ИМПУЛЬСА".



ХЕ-ХЕ-ХЕ.
ДА, ЗАБАВНАЯ ШТУКА - ЭТА КОЛЫБЕЛЬ НЬЮТОНА.



ЭКИ, ТЫ СЛУШАЕШЬ ОБЪЯСНЕНИЕ?

Приложим силу извне (Импульс силы)



ЭКИ-САН ТАК УВЛЕЧЁННО ИГРАЕТ С КОЛЫБЕЛЬЮ НЬЮТОНА... НО СЕЙЧАС Я ХОЧУ ЕЁ НЕМНОГО ПОМЕШАТЬ В ЭТОМ.



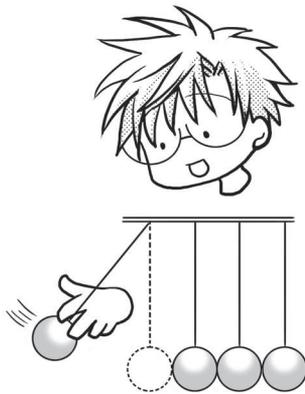
КАК?! ПОЧЕМУ?! ЗНАЧИТ ТЫ, СИРАЦСИ, ВСЁ-ТАКИ ВРЕДИНА...?



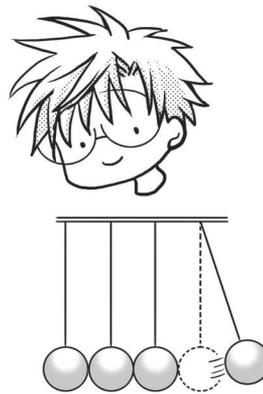
ХИ-ХИ-ХИ... СЕЙЧАС Я ИЗ ВРЕДНОСТИ ПОПРОБУЮ РУКОЙ УМЕНЬШИТЬ СКОРОСТЬ ЛЕВОГО ШАРА В МОМЕНТ СТОЛКНОВЕНИЯ. КАК ВЫ ДУМАЕТЕ, ЧТО ПРОИЗОЙДЁТ ПРИ ЭТОМ?



КОЦ!
ПРАВЫЙ ШАР ОТСКОЧИЛ МЕДЛЕННЕЕ И НИЖЕ, ЧЕМ В ПРОШЛЫЙ РАЗ. КАЖЕТСЯ, ЧТО ОН ОСЛАБ...



Я НЕМНОГО ПОВРЕДИЛ, И...



ВЫСОТА ОТСКОКА УМЕНЬШИЛАСЬ



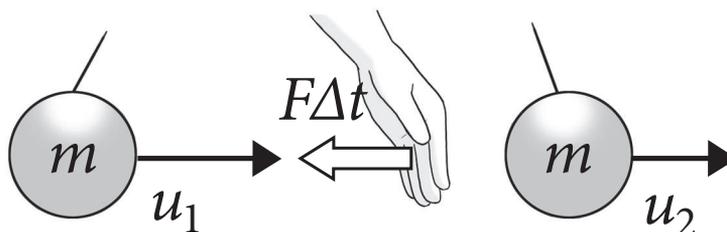
ЗНАЧИТ, ИМПУЛЬС УМЕНЬШИЛСЯ.



ИТАК, ТЕПЕРЬ ДАВАЙТЕ РАССМОТРИМ ЭТО ЯВЛЕНИЕ С ТОЧКИ ЗРЕНИЯ МЕХАНИКИ.



ПОЛОЖИМ, ЧТО КОГДА ЛЕВЫЙ ШАР МАССОЙ m ДВИГАЛСЯ СО СКОРОСТЬЮ u_1 , НА НЕГО ИЗВНЕ СТАЛА ДЕЙСТВОВАТЬ СИЛА F В ТЕЧЕНИЕ ВРЕМЕНИ Δt . ПОСЛЕ ЭТОГО ПРОИЗОШЛО СТОЛКНОВЕНИЕ, И ПРАВЫЙ ШАР ОТСКОЧИЛ СО СКОРОСТЬЮ u_2 .



СИЛА F - ЭТО ТВОЯ РУКА, СИРАИЦИ, НЕ ТАК ЛИ?



ИЗМЕНЕНИЕ ИМПУЛЬСА, КОТОРОЕ ПРИ ЭТОМ ПРОИСХОДИТ, МОЖНО ЗАПИСАТЬ СЛЕДУЮЩИМ ОБРАЗОМ.

$$mu_2 - mu_1 = F\Delta t$$



ЭТО ПРОИЗВЕДЕНИЕ $F\Delta t$ СИЛЫ МОЕЙ РУКИ F И ВРЕМЕНИ Δt НАЗЫВАЕТСЯ "ИМПУЛЬСОМ СИЛЫ".



ТО ЕСТЬ В СЛОВЕСНОЙ ФОРМЕ ЭТО БУДЕТ ТАК: (ИМПУЛЬС ПОСЛЕ ИЗМЕНЕНИЯ) - (ИМПУЛЬС ДО ИЗМЕНЕНИЯ) = (ПРИЛОЖЕННЫЙ ИМПУЛЬС СИЛЫ)



ТАК, У МЕНЯ ВОПРОС!
ИМПУЛЬС ДО ИЗМЕНЕНИЯ БОЛЬШЕ ИМПУЛЬСА ПОСЛЕ ИЗМЕНЕНИЯ, ЗНАЧИТ ПО ЭТОЙ ФОРМУЛЕ ВЫХОДИТ, ЧТО $F\Delta t$ ОТРИЦАТЕЛЬНО! ВОЗМОЖНО ЛИ ТАКОЕ?



ДА. Я ПОВРЕДИЛ И УМЕНЬШИЛ ИМПУЛЬС, ПОЭТОМУ ВПОЛНЕ ЕСТЕСТВЕННО, ЧТО $F\Delta t$ БУДЕТ ИМЕТЬ ЗНАК "МИНУС".



ТО ЕСТЬ ТЫ ПРИЛОЖИЛ ОТРИЦАТЕЛЬНЫЙ ИМПУЛЬС СИЛЫ.



ЭТО УРАВНЕНИЕ ПОКАЗЫВАЕТ, ЧТО ИМПУЛЬС ИЗМЕНЯЕТСЯ РОВНО НА ВЕЛИЧИНУ ПРИЛОЖЕННОГО ИМПУЛЬСА СИЛЫ (СИЛА РУКИ × ВРЕМЯ). ДАВАЙТЕ НАЙДЕМ ВЫРАЖЕНИЕ ДЛЯ СИЛЫ, ПОДЕЛИВ ОБЕ ЧАСТИ УРАВНЕНИЯ НА Δt .

$$F = (mu_2 - mu_1)/\Delta t$$



ТО ЕСТЬ ЭТО ОЗНАЧАЕТ, ЧТО "ДЕЙСТВУЮЩАЯ СИЛА (СИЛА РУКИ) РАВНА ИЗМЕНЕНИЮ ИМПУЛЬСА В ЕДИНИЦУ ВРЕМЕНИ".



ПО ЭТОЙ ФОРМУЛЕ, ЕСЛИ МЫ, ЗНАЯ ВРЕМЯ ДЕЙСТВИЯ МОЕЙ РУКИ, ТО ЕСТЬ ВНЕШНЕЙ СИЛЫ, ОПРЕДЕЛИМ ИМПУЛЬСЫ ДО И ПОСЛЕ ИЗМЕНЕНИЯ, ТО СМОЖЕМ НАЙТИ ДЕЙСТВУЮЩУЮ СИЛУ.



ЯСНО, ЯСНО. Я ХОРОШО ПОНЯЛА ЗАКОН СОХРАНЕНИЯ ИМПУЛЬСА ДЛЯ ТЕЛ!

В потайной комнате... (закон сохранения импульса текучей среды)

ИТАК, РАЗ ТЫ ПОНЯЛА ЗАКОН СОХРАНЕНИЯ ИМПУЛЬСА ДЛЯ ТЕЛ,

ДАВАЙ ПРЯМО СЕЙЧАС ПРИМЕНИМ ЗАКОН СОХРАНЕНИЯ ИМПУЛЬСА К ТЕКУЩИМ СРЕДАМ!



ДАВАЙ!

НО ПОСТОЙТЕ!

ВЕДЬ У ТЕКУЧЕЙ СРЕДЫ, В ОТЛИЧИЕ ОТ ШАРА, НЕТ ОПРЕДЕЛЁННОЙ ФОРМЫ, И МЫ НИЧЕГО НЕ УВИДИМ, ДАЖЕ ЕСЛИ ЗАМЕДИМ ЕЁ РУКОЙ.

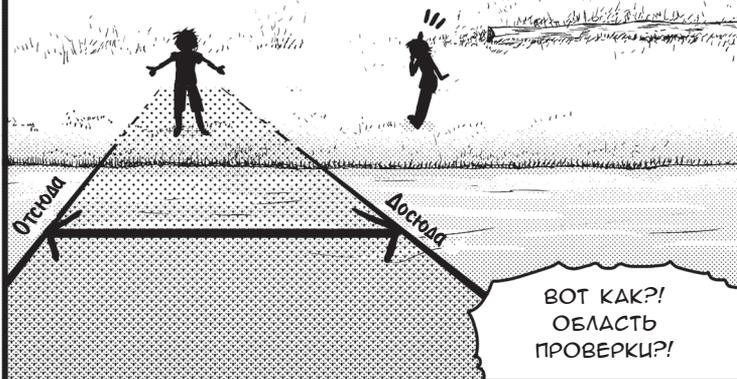


УГУ...

ДА,
ТОЧНО...

ПОЭТОМУ ДЛЯ ТЕКУЩИХ СРЕД ПРИНЯТО ЗАДАВАТЬ ВОООБРАЖАЕМУЮ ОБЛАСТЬ, НАЗЫВАЕМУЮ "ОБЛАСТЬЮ ПРОВЕРКИ".

ПРИ ЭТОМ РАЗМЫШЛЯЮТ О РАВНОВЕСИИ СИЛ, СОХРАНЕНИИ ИМПУЛЬСА И ЭНЕРГИИ ДЛЯ ТЕКУЧЕЙ СРЕДЫ, НАХОДЯЩЕЙСЯ ВНУТРИ ЭТОЙ ОБЛАСТИ.



ВОТ КАК?!
ОБЛАСТЬ
ПРОВЕРКИ?!

НАПРИМЕР, ВЗГЛЯНИТЕ НА ЭТУ ТРУБУ, ЦОДУШНУЮ ОТ ВОДОУЛИВНОГО НАСОСА.

ВНУТРИ НЕЁ ТЕЧЁТ ОЧЕНЬ МНОГО ВОДЫ, НЕ ТАК ЛИ?

ДА, ЭТО
ТАК.

А В ЭТОМ МЕСТЕ ТРУБА СУЖАЕТСЯ.

ДАВАЙТЕ РАССМОТРИМ ИМПУЛЬС ТЕКУЧЕЙ СРЕДЫ ВНУТРИ, ПРИНЯВ ЭТО МЕСТО ЗА ОБЛАСТЬ ПРОВЕРКИ.

Это место!

РАССМОТРИМ?
НО КАК МЫ МОЖЕМ УЗНАТЬ
О ТЕЧЕНИИ ВНУТРИ ТРУБЫ
В ПРЕДЕЛАХ ОБЛАСТИ
ПРОВЕРКИ?

ДЕЛО В ТОМ, ЧТО
НЕ ОБЯЗАТЕЛЬНО РАС-
СМАТРИВАТЬ ИМПУЛЬС
В ПРЕДЕЛАХ САМОЙ
ОБЛАСТИ ПРОВЕРКИ.

ДОСТАТОЧНО ПРОВЕРИТЬ
ИМПУЛЬСЫ НА ВХОДЕ
И НА ВЫХОДЕ ОБЛАСТИ
ПРОВЕРКИ.

НАЙДЯ ВРЕМЕННОЕ
ИЗМЕНЕНИЕ ИМПУЛЬСА, МЫ
СМОЖЕМ УЗНАТЬ ИМПУЛЬС
В САМОЙ ОБЛАСТИ
ПРОВЕРКИ.

Ого...

А-А-А!

ЧТОБЫ УЗНАТЬ, ЧТО ПРОИСХО-
ДИТ В ПОТАЙНОЙ КОМНАТЕ,
ДОСТАТОЧНО ПОНАБЛЮДАТЬ
ЗА ЛЮДЬМИ, КОТОРЫЕ ВХОДЯТ
ТУДА И ВЫХОДЯТ ОТТУДА! КАК
ВАМ ТАКОЕ СРАВНЕНИЕ?
ЗАОРОВО!
ЧУВСТВУЕШЬ СЕБЯ СЕК-
РЕТНЫМ СЫЩИКОМ!

Уныло

Весело

Вход

Выход

Понятно

КОНЕЧНО, ЕСЛИ
РАССУЖДАТЬ
ОБРАЗНО...

НУ...

Кхе

ИТАК, ДАВАЙТЕ
ПОПРОБУЕМ ПРЕДСТАВИТЬ,
ЧТО ПРОИСХОДИТ В ЭТОЙ
РЕЗКО СУЗИВШЕЙСЯ
ТРУБЕ НАСОСА.

ИТАК, НАЧИНАЕМ
МОЛНИЕНОСНОЕ РАС-
СЛЕДОВАНИЕ С ПО-
МОЩЬЮ РАСЧЁТОВ И
РИСУНКОВ.

СЛЕДИТЕ
ВНИМАТЕЛЬНО!

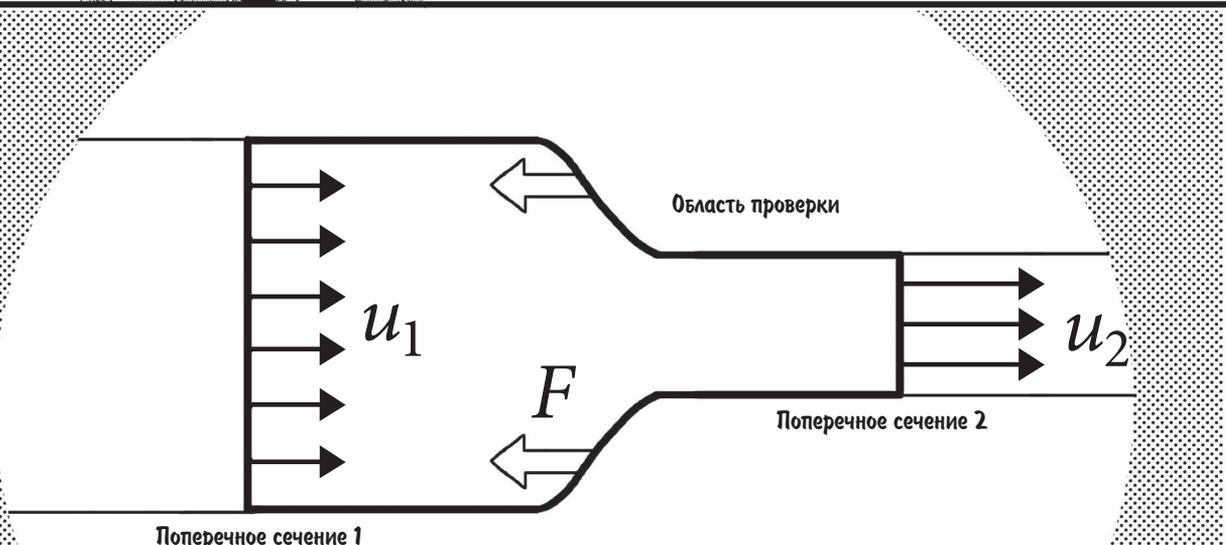
Давай!

НАЧИНАЙ!



ДЛЯ НАЧАЛА, ВЗГЛЯНИТЕ НА РИСУНОК НИЖЕ. ЖИРНОЙ ЛИНИЕЙ ОБВЕДЕНА ОБЛАСТЬ ПРОВЕРКИ.

ТЕКУЧАЯ СРЕДА, ВОШЕДШАЯ В ОБЛАСТЬ ПРОВЕРКИ ЧЕРЕЗ ПОПЕРЕЧНОЕ СЕЧЕНИЕ 1 СО СКОРОСТЬЮ u_1 , ВЫХОДИТ ЧЕРЕЗ ПОПЕРЕЧНОЕ СЕЧЕНИЕ 2 СО СКОРОСТЬЮ u_2 . НА ТЕКУЩУЮ СРЕДУ ВНУТРИ ОБЛАСТИ ПРОВЕРКИ ДЕЙСТВУЕТ СИЛА F ОТ СТЕНКИ ТРУБЫ.



ПОСМОТРИМ, КАК ИЗМЕНЯЕТСЯ ВО ВРЕМЕНИ ИМПУЛЬС ВНУТРИ ОБЛАСТИ ПРОВЕРКИ. ДОСТАТОЧНО ВЫЧЕСТЬ ИЗ ИМПУЛЬСА, ВЫХОДЯЩЕГО ЧЕРЕЗ ПОПЕРЕЧНОЕ СЕЧЕНИЕ 2, ИМПУЛЬС, ВХОДЯЩИЙ ЧЕРЕЗ ПОПЕРЕЧНОЕ СЕЧЕНИЕ 1.

Сейчас мы узнаем, что там произошло!



ИТАК, ЕСЛИ ПРИНЯТЬ ПЛОТНОСТЬ ВОДЫ ЗА ρ [КГ/М³] И СКОРОСТЬ ВОДЫ ЗА u [М/С], ТО ИМПУЛЬС ЕДИНИЧНОГО ОБЪЕМА БУДЕТ РАВЕН ρu . ВОТ ЧТО МЫ ПОЛУЧИМ, НЕ ТАК ЛИ?

$$\rho u \left[\frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \right] \cdot \left[\frac{\text{м}}{\text{с}} \right]$$

Если изменить порядок....!

$$\rho u \left[\frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \cdot \frac{\text{м}}{\text{с}} \right]$$

Масса Скорость На единицу объема

Импульс

ВОТ КАК? МАССА × СКОРОСТЬ = ИМПУЛЬС! (СМ. СТ. 82) М³ В ЗНАМЕНАТЕЛЕ - КУБ С ДЛИНОЙ РЕБРА 1 М, ТО ЕСТЬ ЕДИНИЧНЫЙ ОБЪЕМ!



ЧИРК, ЧИРК



ТЕПЕРЬ ПОПРОБУЕМ
НАЙТИ ИМПУЛЬС
В ЕДИНИЦУ ВРЕМЕНИ
 $\rho u Q$.

Импульс

ЧТОБЫ НАЙТИ ИМПУЛЬС В ЕДИНИЦУ
ВРЕМЕНИ, ДОСТАТОЧНО УМНОЖИТЬ
"ИМПУЛЬС ЕДИНИЧНОГО ОБЪЁМА"
НА РАСХОД ТЕКУЧЕЙ СРЕДЫ Q [$\text{м}^3/\text{с}$].

Импульс в единицу времени $\rho u Q =$

$$\begin{array}{ccc} \text{Импульс} & \times & \text{Расход} \\ \text{единичного} & & \text{текучей} \\ \text{объёма } \rho u & & \text{среды } Q \\ \left[\frac{\text{кг}}{\text{с}} \cdot \frac{\text{м}}{\text{м}^3} \right] & & \text{м}^3/\text{с} \end{array}$$

Импульс,
входящий
за единицу
времени

$$\rho u_1 \times Q$$

Импульс
единичного
объёма Расход
текучей
среды

Импульс,
выходящий
за единицу
времени

$$\rho u_2 \times Q$$

Импульс
единичного
объёма Расход
текучей
среды

ЕСЛИ УМНОЖИТЬ ρu [$\text{кг}\cdot\text{м}/\text{с}^2/\text{м}^3$]
НА Q [$\text{м}^3/\text{с}$], ТО м^3 СОКРАТИТСЯ
И МЫ ПОЛУЧИМ ЕДИНИЦУ ИЗМЕРЕНИЯ
[$\text{кг}\cdot\text{м}/\text{с}^2/\text{с}$]

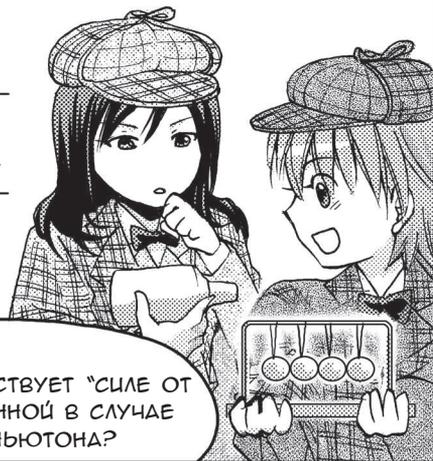
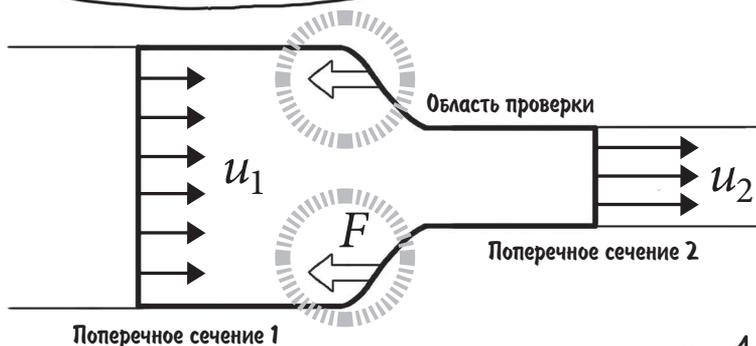
ЭТО ИМПУЛЬС, ПОДЕЛЁННЫЙ
НА [с] (СЕКУНДА), ЗНАЧИТ $\rho u Q$
- ЭТО ДЕЙСТВИТЕЛЬНО
ИМПУЛЬС В ЕДИНИЦУ ВРЕМЕНИ.

ДРУГИМИ СЛОВАМИ, ИЗМЕНЕНИЕ ИМПУЛЬСА ВНУТРИ
ОБЛАСТИ ПРОВЕРКИ В ЕДИНИЦУ ВРЕМЕНИ МОЖНО
НАЙТИ ВОТ ТАК! ИЗМЕНЕНИЕ ИМПУЛЬСА ВНУТРИ
ОБЛАСТИ ПРОВЕРКИ В ЕДИНИЦУ ВРЕМЕНИ =
ИМПУЛЬС, ВЫХОДЯЩИЙ ЧЕРЕЗ ПОПЕРЕЧНОЕ
СЕЧЕНИЕ 2 ЗА ЕДИНИЦУ ВРЕМЕНИ $\rho u_2 Q$ -
ИМПУЛЬС, ВХОДЯЩИЙ ЧЕРЕЗ ПОПЕРЕЧНОЕ
СЕЧЕНИЕ 1 ЗА ЕДИНИЦУ ВРЕМЕНИ $\rho u_1 Q$

ЛОГИКА ЗАЕЩЬ ТАКАЯ ЖЕ,
КАК В ТОЛЬКО ЧТО ОПИСАННОМ
СЛУЧАЕ С КОЛЫБЕЛЬЮ
НЬЮТОНА!

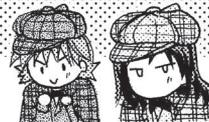
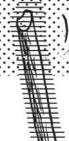
В ДАННОМ СЛУЧАЕ СИЛОЙ, ДЕЙСТВУЮЩЕЙ НА ТЕКУЩУЮ СРЕДУ В ОБЛАСТИ ПРОВЕРКИ, ЯВЛЯЕТСЯ СИЛА F , ПРИЛОЖЕННАЯ ОТ СУЖАЮЩЕЙСЯ ЧАСТИ ТРУБЫ.

АГА! АГА!



ЗНАЧИТ, ОНА СООТВЕТСТВУЕТ "СИЛЕ ОТ РУКИ" F , РАССМОТРЕННОЙ В СЛУЧАЕ С КОЛЫБЕЛЬЮ НЬЮТОНА?

ИЗ ВЫШЕСКАЗАННОГО СЛЕДУЕТ, ЧТО УРАВНЕНИЕ ЗАКОНА СОХРАНЕНИЯ ИМПУЛЬСА ДЛЯ ТЕКУЩЕЙ СРЕДЫ ВНУТРИ ОБЛАСТИ ПРОВЕРКИ...



Ax
Ax

...БУДЕТ ВЫГЛЯДЕТЬ ВОТ ТАК!

$$\rho u_2 Q - \rho u_1 Q = F$$

ТО ЕСТЬ ЭТО ОЗНАЧАЕТ, ЧТО ИЗМЕНЕНИЕ ИМПУЛЬСА ВНУТРИ ОБЛАСТИ ПРОВЕРКИ ЗА ЕДИНИЦУ ВРЕМЕНИ РАВНО СИЛЕ, ПРИЛОЖЕННОЙ ОТ СУЖАЮЩЕЙСЯ ЧАСТИ ТРУБЫ, ПРАВИЛЬНО?

УРА! КАК ЗАОРОВО! МЫ ОТГАДАЛИ ЗАГАДКУ!

ЕСЛИ ТОЛЬКО СМОТРЕТЬ
НА ФОРМУЛЫ, ТО ЭТО МОЖЕТ
ПОКАЗАТЬСЯ СЛОЖНЫМ. НО ЕСЛИ
ПРОВАДИТЬСЯ ПО ПОРЯДКУ ШАГ ЗА
ШАГОМ, ТО ВСЁ СТАНЕТ ЯСНО.

ЗАПУТАННЫЕ ПРЕСТУПЛЕНИЯ
ТОЖЕ РАСКРЫВАЮТ ИМЕННО
ТАК, ПУТЁМ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬ-
НЫХ УМОЗАКЛЮЧЕНИЙ!



КСТАТИ, ЭТОТ ЗАКОН СОХРАНЕНИЯ
ИМПУЛЬСА ВЫПОЛНЯЕТСЯ ДЛЯ
ПРОИЗВОЛЬНОЙ ОБЛАСТИ ПРОВЕРКИ,
ПОЭТОМУ ЕЁ МОЖНО ЗАДАВАТЬ ТАК,
КАК ВАМ УДОБНО.



КАКАЯ ВСЁ-ТАКИ
УДИВИТЕЛЬНАЯ ВЕЩЬ -
ЭТОТ ЗАКОН СОХРАНЕ-
НИЯ ИМПУЛЬСА.

ЕГО МОЖНО ПРИМЕНЯТЬ И ДЛЯ ПЛОТИН,
И ДЛЯ РЕК, И ДЛЯ НЕВИДИМЫХ УЧАСТКОВ
ВРОДЕ ТРУБЫ. РАЗМЕР И МЕСТО ТУТ РОЛИ
НЕ ИГРАЮТ.



ОБЛАСТЬ ПРОВЕРКИ,
СЛИШКОМ УЖ УДОБНОЕ
ПОНЯТИЕ. ПРЯМО
КАКАЯ-ТО МАГИЯ...



Пик, пик
пик, пик

Ой...

ИТАК, ДАВАЙТЕ ЗАКОНЧИМ
НА ЭТОМ.

И ВРЕМЯ УЖЕ
ПОДОШЛО!



ВРЕМЯ??

ТЕСТО ДЛЯ УАОНА.
ОНО УЖЕ ДОШЛО.

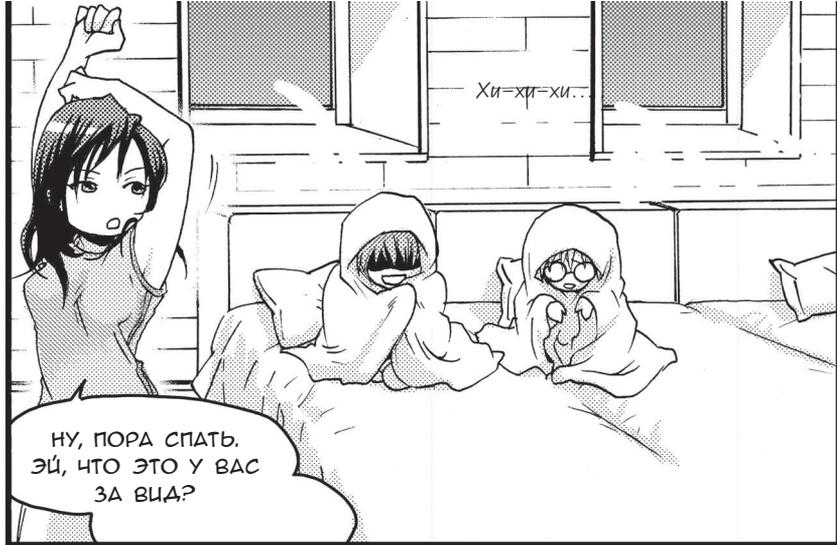
ИТАК! ТЕПЕРЬ МЫ
ОТВЕДАЕМ НАГАСИ-
УАОН!

АХ,
А Я СОВСЕМ
ЗАБЫЛА
ПРО ЭТО.

УРА!
УАОН, УАОН!



ДА, СЕГОДНЯ МЫ МНОГО СДЕЛАЛИ.



Хи-хи-хи...

НУ, ПОРА СПАТЬ. ЭЙ, ЧТО ЭТО У ВАС ЗА ВИД?



ЗНАЕШЬ, АКАНЭ...

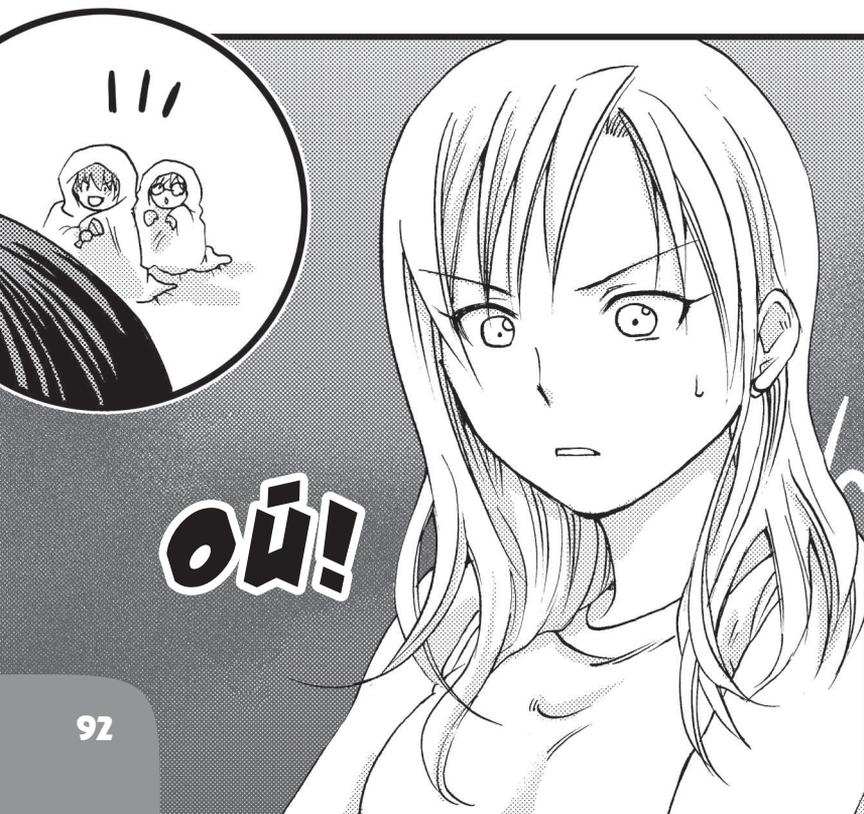
ТУТ, ГОВОРЯТ, ОКРОВАВЛЕННЫЙ ПРИЗРАК ПО НОЧАМ ЯВЛЯЕТСЯ...

ХОЧЕШЬ С НИМ ВСТРЕТИТЬСЯ?

ЩЁЛК!

ВОТ ЭКИ-САН И ПРЕДЛОЖИЛА ВСЮ НОЧЬ РАССКАЗЫВАТЬ СТРАШНЫЕ ИСТОРИИ.

ДЕЙСТВИТЕЛЬНО, ГОВОРЯТ, ЧТО ПРИВИДЕНИЯ ЯВЛЯЮТСЯ, КОГДА РАССКАЗЫВАЮТ СТРАШНЫЕ ИСТОРИИ.



!!!

ОУ!



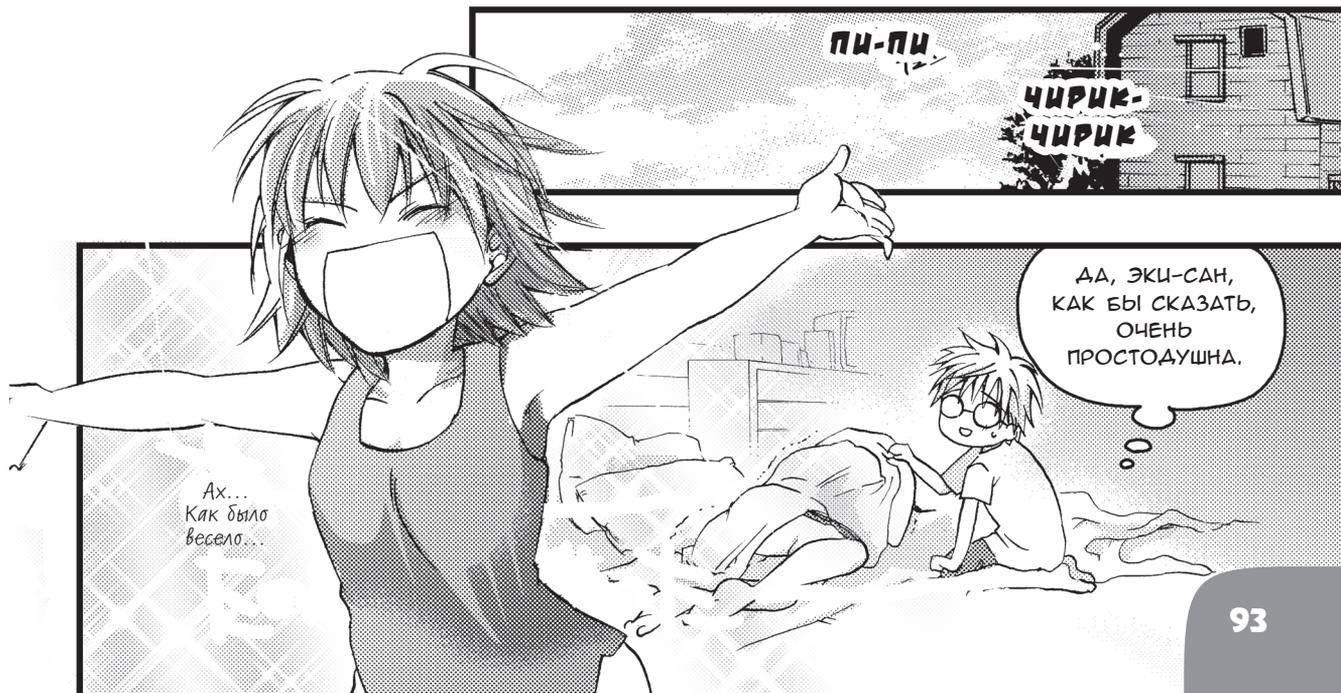
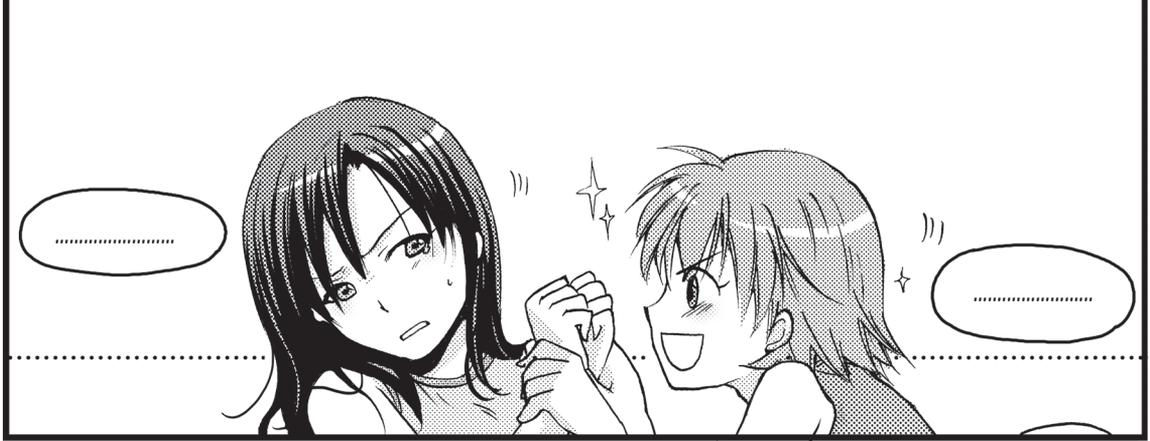
ЭЙ, АКАНЭ!

МОЖЕТ БЫТЬ ТЫ...

...БОИШЬСЯ СЛУШАТЬ СТРАШНЫЕ ИСТОРИИ?!

ХВАТЬ

БАЦ

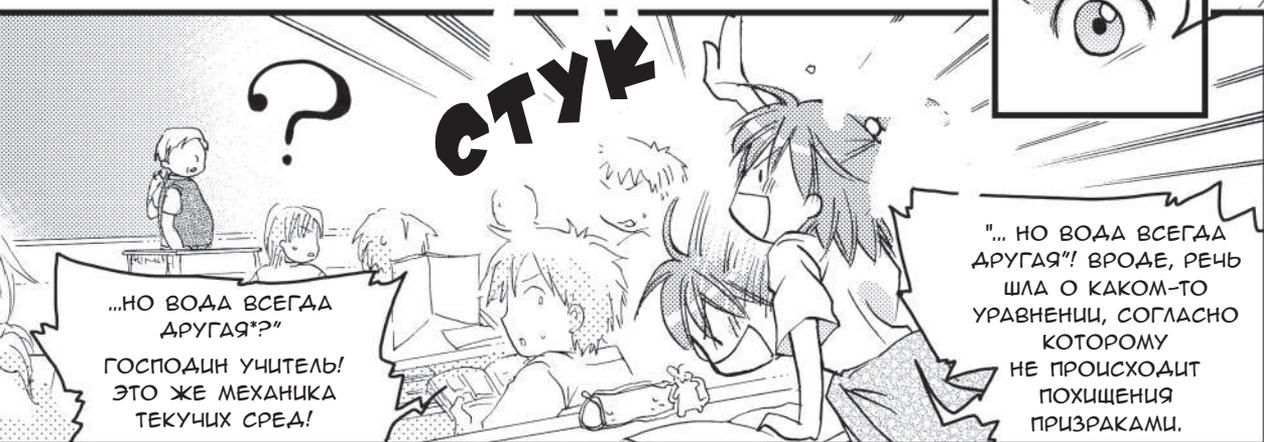


Глава 3

ЛАМИНАРНОЕ И ТУРБУЛЕНТНОЕ ТЕЧЕНИЕ



1. ТЕЧЕНИЕ, ОБЛАДАЮЩЕЕ ВЯЗКОСТЬЮ



* «Река течёт непрерывно, но вода всегда другая» – крылатая фраза из древней японской повести «Хижина отшельника».





Густо или жидко? (Вязкость)

ИТАК, СЕГОДНЯ
Я РАССКАЖУ
О ЯВЛЕНИИ, БЕЗ ЗНАНИЯ
О КОТОРОМ...

Вязкость

...НЕМЫСЛИМО
ИЗУЧЕНИЕ МЕХАНИКИ
ТЕКУЩИХ СРЕД -
О "ВЯЗКОСТИ"!

ВЯЗКОСТЬ - ЭТО
СЛОВО ОЗНАЧАЕТ...

...ГУСТОТУ, КЛЕЙКОСТЬ
ИЛИ ЧТО-ТО В ЭТОМ
РОДЕ?

ВЕРНО.

НО НЕЛЬЗЯ ЗАБЫВАТЬ
О ТОМ, ЧТО ДАЖЕ ВОДА
И ПОДОБНЫЕ ЕЁ
ЖИДКОСТИ "ОБЛАДАЮТ
ВЯЗКОСТЬЮ".

КАК?!

НЕУЖЕЛИ БЫВАЕТ
ГУСТАЯ ВОДА?!

НЕТ, ТУТ ИМЕ-
ЕТСЯ В ВИДУ
ДРУГОЕ.

ВЯЗКОСТЬ - ЭТО ФИЗИЧЕ-
СКАЯ ВЕЛИЧИНА, ПОКАЗЫВА-
ЮЩАЯ СТЕПЕНЬ ГУСТОТЫ
ТЕКУЧЕЙ СРЕДЫ.

ВЯЗКОСТЬ ИМЕЕТ СВОЙСТВО
ЗАТРУДНЯТЬ ТЕЧЕНИЕ, ПОЭТОМУ
ЧЕМ ВЫШЕ ВЯЗКОСТЬ, ТЕМ
ГУЩЕ, А ЧЕМ НИЖЕ - ТЕМ
ЖИЩЕ. ВОТ В ТАКОМ ДУХЕ.

ЗНАЧИТ, ЧЕМ
СИЛЬНЕЕ ВЯЗКОСТЬ,
ТЕМ ТРУДНЕЕ
ПЕРЕМЕШИВАТЬ.

Вязкость

Высокая



Густо, клейко

Жидко,
не клейко

Низкая

Воздух

Прямо
как этот
коктейль...

ШМЯК,
ШМЯК

Вредина, мешающая течению?! (Сила вязкости)

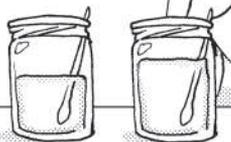
ПРИ НАЛИЧИИ ВЯЗКОСТИ
В ТЕКУЧЕЙ СРЕДЕ ВОЗНИКАЕТ
ЯВЛЕНИЕ, НАЗЫВАЕМОЕ
"СИЛОЙ ВЯЗКОСТИ".

СРАЗУ



Я ПОДГОТОВИЛ ДВЕ
БАНКИ, В ОДНОЙ
ИЗ КОТОРЫХ - ГУСТАЯ
ПАТОКА, А В ДРУГОЙ -
ОБЫЧНАЯ ВОДА.

Патока!



ДАВАЙТЕ ПОПРОБУЕМ
ЗАСТАВИТЬ ИХ ТЕЧЬ
ПО ЭТИМ НАКЛОННЫМ
ДОСКАМ.

СИЛА, КОТОРАЯ БУДЕТ ПРИ
ЭТОМ "МЕШАТЬ ТЕЧЕНИЮ"
- ЭТО СИЛА ВЯЗКОСТИ.



ТУК, ТУК

Мм.

АА, ЭТА СИЛА ВЯЗКОСТИ -
БОЛЬШАЯ ВРЕДИНА. И ЧТО
БУДЕТ С БЕДНЫМ ТЕЧЕНИЕМ?

ТАК, РАЗ ЭТА СИЛА
ПРЕПЯТСТВУЕТ
ТЕЧЕНИЮ,...

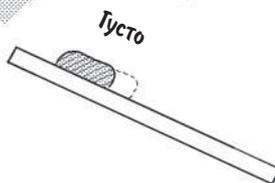
...ЗНАЧИТ, ТЕЧЕНИЕ
ЖИДКОСТИ С БОЛЬШОЙ
ВЯЗКОСТЬЮ СРАЗУ ЖЕ
ПРЕКРАТИТСЯ?



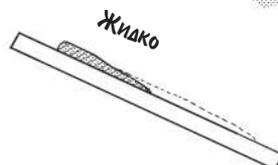
ИМЕННО ТАК!

ТЕЧЕНИЕ ПАТОКИ ИЛИ
МОЛОЧНОГО КОКТЕЙЛЯ,
У КОТОРЫХ ВЫСОКАЯ
ВЯЗКОСТЬ, СРАЗУ ЖЕ
ОСТАНОВИТСЯ,
НЕ ТАК ЛИ?

ВОТ КАК?
ЗНАЧИТ, ВОДА,
У КОТОРОЙ НИЗКАЯ
ВЯЗКОСТЬ, БУДЕТ ТЕЧЬ
ЛЕГКО, ДА?



В случае высокой
вязкости



В случае низкой
вязкости

1. ТЕЧЕНИЕ, ОБЛАДАЮЩЕЕ ВЯЗКОСТЬЮ

💧 То ускоряет, то замедляет (Механизм действия силы вязкости)



ИТАК, ТЕПЕРЬ Я ПОДРОБНО РАССКАЖУ О МЕХАНИЗМЕ ДЕЙСТВИЯ СИЛЫ ВЯЗКОСТИ! ВОБРАЗИТЕ СЕБЕ, ЧТО ВЫ НА УРОКЕ ФИЗКУЛЬТУРЫ И БЕЖИТЕ МАРАФОН.

ПО ПАРАЛЛЕЛЬНЫМ ДОРОЖКАМ БЕГУТ ДВЕ ГРУППЫ - БЫСТРАЯ И МЕДЛЕННАЯ. ПУСТЬ ЭКИ-САН, КОТОРАЯ БЫЛА В МЕДЛЕННОЙ ГРУППЕ, ПЕРЕШЛА НА ДРУГУЮ ДОРОЖКУ И ОЧУТИЛАСЬ В БЫСТРОЙ ГРУППЕ.



ПРИ ЭТОМ БЕГ БЫСТРОЙ ГРУППЫ ЗАМЕДЛИТСЯ. ЭТО ПРОИЗОЙДЁТ ПОТОМУ, ЧТО БЕГУНАМ ПРИДЁТСЯ БЕЖАТЬ МЕДЛЕННЕЕ, ЧТОБЫ ИЗБЕЖАТЬ СТОЛКНОВЕНИЯ С ЭКИ-САН.



ПОЛУЧАЕТСЯ, ЧТО Я ВСЕМ МЕШАЮ, ПОТОМУ ЧТО БЕГУ НЕТОРОПЛИВО!



НУ, НЕ ПЕРЕЖИВАЙ. ЭТО ВСЕГО ЛИШЬ ПРИМЕР.



ТЕПЕРЬ ПРЕДСТАВИМ ОБРАТНУЮ СИТУАЦИЮ: СТАРОСТА АКАНЭ, КОТОРАЯ БЕЖАЛА В БЫСТРОЙ ГРУППЕ, СЛУЧАЙНО ПЕРЕШЛА НА ДРУГУЮ ДОРОЖКУ И ОЧУТИЛАСЬ В МЕДЛЕННОЙ ГРУППЕ.

ПРИ ЭТОМ БЕГ МЕДЛЕННОЙ ГРУППЫ УСКОРИТСЯ. ЭТО ПРОИЗОЙДЁТ ПОТОМУ, ЧТО БЕГУНАМ ПРИДЁТСЯ БЕЖАТЬ БЫСТРЕЕ, ЧТОБЫ ИЗБЕЖАТЬ СТОЛКНОВЕНИЯ СО СТАРОСТОЙ АКАНЭ.

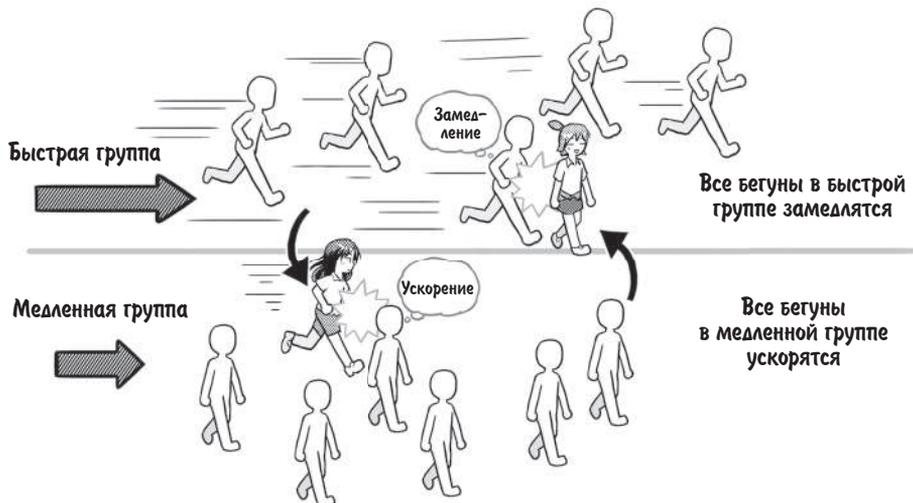


ДА, ПОЛУЧАЕТСЯ, ЧТО Я ВСЕХ ПОДГОНЯЮ.



С ТОЧКИ ЗРЕНИЯ ИМПУЛЬСА, МЕДЛЕННАЯ ГРУППА ПОЛУЧИЛА БОЛЬШОЙ ИМПУЛЬС ОТ БЫСТРОЙ СТАРОСТЫ АКАНЭ. ДРУГИМИ СЛОВАМИ, ЭТО ОЗНАЧАЕТ, ЧТО БЫЛА ПРИЛОЖЕНА СИЛА.

ВОТ РИСУНОК, ПОДЫТОЖИВАЮЩИЙ ЭТУ СИТУАЦИЮ. КАК ВЫ ЗНАЕТЕ, ЕСЛИ ОДНА МАШИНА НА ТРАССЕ СБАВИТ СКОРОСТЬ, ТО ОСТАЛЬНЫЕ ТОЖЕ ЗАМЕДЛЯТСЯ, А ЕСЛИ НАОБОРОТ - ПРИБАВИТ ГАЗУ, ТО ОСТАЛЬНЫЕ ТОЖЕ УСКОРЯТСЯ. ПРИДУМАННАЯ МНОЮ СИТУАЦИЯ СОВЕРШЕННО АНАЛОГИЧНА.



Источник: «Основы механики текучих сред», стр. 120, рис. 4.2, совместное авторство Иида Акиёси, Огава Таканобу, Акэи Акихиро, изд. Ohmsha (2007); приводится с частичными изменениями



ХМ... ПРИМЕРЫ С МАРАФОНОМ И МАШИНАМИ, КОНЕЧНО, ПОНЯТНЫ, НО ПОЧЕМУ ВООБЩЕ ОБ ЭТОМ ЗАШЁЛ РАЗГОВОР? ТЫ ВРОДЕ ОБЕЩАЛ ОБЪЯСНИТЬ НАМ МЕХАНИЗМ ДЕЙСТВИЯ СИЛЫ ВЯЗКОСТИ?



ХА-ХА-ХА. ИЗВИНЯЮСЬ ЗА ДОЛГОЕ ВСТУПЛЕНИЕ. НА САМОМ ДЕЛЕ, ИМЕННО ЭТА СИЛА, КОТОРАЯ ТО УСКОРЯЕТ, ТО ЗАМЕДЛЯЕТ, И ЯВЛЯЕТСЯ "СИЛОЙ ВЯЗКОСТИ"!

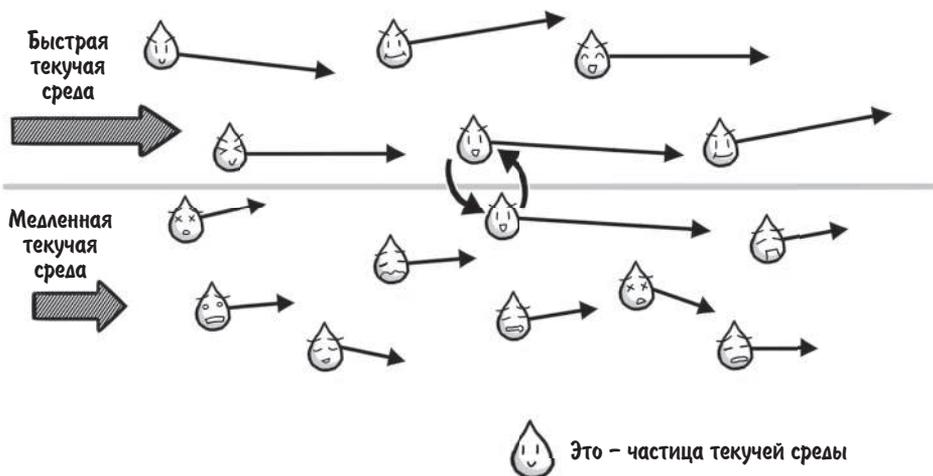


КАК?! ЧТО ЭТО ЗНАЧИТ? ТЫ ЖЕ ТОЛЬКО ЧТО ГОВОРИЛ, ЧТО СИЛА ВЯЗКОСТИ - ЭТО "СИЛА, КОТОРАЯ ПРЕПЯТСТВУЕТ ТЕЧЕНИЮ".



ДА, ЭТО НЕМНОЖКО СЛОЖНО, ОДНАКО ТЕЧЕНИЕ ЗАТРУДНЯЕТСЯ В РЕЗУЛЬТАТЕ ДЕЙСТВИЯ СИЛЫ, КОТОРАЯ ТО УСКОРЯЕТ, ТО ЗАМЕДЛЯЕТ.

ИТАК, ДАВАЙТЕ ПОПРОБУЕМ УПОДОБИТЬ ТЕКУЧУЮ СРЕДУ ТОМУ ПРИМЕРУ С МАРАФОНОМ, О КОТОРОМ Я ТОЛЬКО ЧТО РАССКАЗАЛ.



Состояние, в котором один быстрый малыш-частица текучей среды очутился в медленной группе



ЯСНО, ЯСНО. ДВЕ ГРУППЫ МАЛЫШЕЙ - БЫСТРАЯ И МЕДЛЕННАЯ - БЕГУТ ПО СОСЕДНИМ ДОРОЖКАМ.



И ОДИН БЫСТРЫЙ МАЛЫШ СЛУЧАЙНО ПОПАЛ В МЕДЛЕННУЮ ГРУППУ. КАК ЭТО СЛУЧИЛОСЬ СО МНОИ В ПРЕДЫДУЩЕМ ПРИМЕРЕ С МАРАФОНОМ.



ПОПРОБУЕМ ИЗУЧИТЬ СИТУАЦИЮ, КОГДА ДВА ТЕЧЕНИЯ С РАЗНЫМИ СКОРОСТЯМИ ТЕКУЩИХ СРЕД СОПРИКАСАЮТСЯ. ХОТЯ СКОРОСТИ ТЕКУЩИХ СРЕД НАПРАВЛЕННЫ ПАРАЛЛЕЛЬНО, НА САМОМ ДЕЛЕ ЧАСТИЦЫ ТЕКУЩИХ СРЕД ДВИЖУТСЯ БЕСПОРЯДОЧНО, ПОЭТОМУ ИНОГДА БЫСТРЫЕ ЧАСТИЦЫ ПОПАДАЮТ В МЕДЛЕННУЮ ТЕКУЩУЮ СРЕДУ, А ИНОГДА ПРОИСХОДИТ НАОБОРОТ.



ЯСНО. ПРИ ЭТОМ БЫСТРАЯ ТЕКУЩАЯ СРЕДА ЗАМЕДЛИТСЯ, А МЕДЛЕННАЯ ТЕКУЩАЯ СРЕДА УСКОРИТСЯ, КАК И В СЛУЧАЕ С МАРАФОНОМ.



ТАКИМ ОБРАЗОМ, СИЛА ВЯЗКОСТИ ДЕЙСТВУЕТ НА ТЕХ УЧАСТКАХ, ГДЕ СУЩЕСТВУЕТ РАЗНОСТЬ МЕЖДУ СКОРОСТЯМИ ТЕКУЩИХ СРЕД.



ТАК ЭТО И ЕСТЬ МЕХАНИЗМ ДЕЙСТВИЯ СИЛЫ ВЯЗКОСТИ? ЗНАЧИТ ЭТО СИЛА, КОТОРАЯ ВОЗНИКАЕТ ИЗ-ЗА МАЛЫШЕЙ-ЧАСТИЦ ТЕКУЩЕЙ СРЕДЫ.



УГУ. ГОВОРЯ ТОЧНЕЕ, СИЛА ВЯЗКОСТИ - ЭТО СИЛА, ВОЗНИКАЮЩАЯ ВНУТРИ ТЕКУЩЕЙ СРЕДЫ.

💧 Это что – призрак?

(Идеальная текучая среда и вязкая текучая среда)



ИТАК, СЕЙЧАС НАС ЖДЁТ ОЧЕНЬ ВАЖНАЯ БЕСЕДА. Я РАССКАЖУ ОБ «ИДЕАЛЬНОЙ ТЕКУЧЕЙ СРЕДЕ» И «ВЯЗКОЙ ТЕКУЧЕЙ СРЕДЕ»*.

* Идеальную текучую среду называют ещё, например, «невязкой текучей средой», а вязкую текучую среду, например, «реальной текучей средой».

ВЗГЛЯНИТЕ СЮДА. ЭТО – РАСПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТЕЙ ТЕКУЧЕЙ СРЕДЫ, ТЕКУЩЕЙ ПО ТРУБЕ.



Распределение скоростей текучей среды, текущей внутри трубы

*Далее по тексту «сдвигающая сила, вызванная вязкостью» будет именоваться «силой вязкости».



НА САМОМ ДЕЛЕ ТЕКУЩИЕ СРЕДЫ, РЕАЛЬНО СУЩЕСТВУЮЩИЕ ВОКРУГ НАС, ОБЛАДАЮТ ВЯЗКОСТЬЮ И НАЗЫВАЮТСЯ «ВЯЗКИМИ ТЕКУЩИМИ СРЕДАМИ». КОГДА ВЯЗКИЕ ТЕКУЩИЕ СРЕДЫ ТЕКУТ, РАСПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТЕЙ ТЕКУЧЕЙ СРЕДЫ СООТВЕТСТВУЕТ ПРАВОМУ РИСУНКУ.



ВОТ КАК! НА УЧАСТКАХ ТРЕНИЯ СО СТЕНКОЙ СКОРОСТЬ ТЕКУЧЕЙ СРЕДЫ САМАЯ НИЗКАЯ. ПОХОЖЕ, ЧТО ОНА ПОСТЕПЕННО СНИЖАЕТСЯ К КРАЯМ, ПОТОМУ ЧТО СТЕНКА ТОРМОЗИТ ТЕКУЩУЮ СРЕДУ.



А В ЦЕНТРЕ – САМАЯ БОЛЬШАЯ СКОРОСТЬ! ДЕЙСТВИТЕЛЬНО, ТЕЧЕНИЕ РЕКИ ТОЖЕ СООТВЕТСТВУЕТ ЭТОМУ. У БЕРЕГОВ ТЕЧЕНИЕ МЕДЛЕННОЕ, НО ЧЕМ ДАЛЬШЕ ОТПЛЫВАЕШЬ К ЦЕНТРУ РЕКИ, ТЕМ ОНО СТАНОВИТСЯ БЫСТРЕЕ.



НА САМОМ ДЕЛЕ, В ТЕОРЕМЕ БЕРНУЛЛИ, ЦИЛИ, НАПРИМЕР, В ЗАКОНЕ СОХРАНЕНИЯ ИМПУЛЬСА, КОТОРЫЕ МЫ ИЗУЧИЛИ В ПРОШЛЫЙ РАЗ, РАССМАТРИВАЕТСЯ ТОЛЬКО "ИДЕАЛЬНАЯ ТЕКУЧАЯ СРЕДА". У ИДЕАЛЬНОЙ ТЕКУЧЕЙ СРЕДЫ НЕТ ВЯЗКОСТИ. МОЖНО СКАЗАТЬ, ЧТО ЭТО ГИПОТЕТИЧЕСКАЯ ТЕКУЧАЯ СРЕДА.



ЧТО?! ЭТО БЫЛО ВСЕГО ЛИШЬ ПРИЗРАКОМ?! НЕУЖЕЛИ?! ТОГДА О ЧЁМ ЖЕ МЫ ГОВОРИЛИ В ПРОШЛЫЙ РАЗ??!



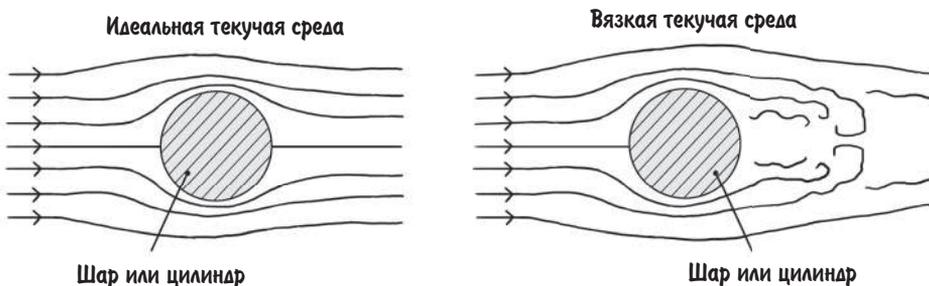
УСПОКОЙСЯ, ПОЖАЛУЙСТА! ДЕЛО В ТОМ, ЧТО ДЛЯ ПОНИМАНИЯ ОСОБЕННОСТЕЙ ДВИЖЕНИЯ ТЕКУЧИХ СРЕД ЦИЛИ, НАПРИМЕР, ДЛЯ ИХ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ БЕЗ ГИПОТЕТИЧЕСКОЙ ТЕКУЧЕЙ СРЕДЫ НЕ ОБОЙТИСЬ.



ТАК ВОТ ОНО ЧТО... ЗНАЧИТ, СНАЧАЛА МЫ РАССМАТРИВАЕМ ТЕЧЕНИЕ С ПОМОЩЬЮ ИДЕАЛЬНОЙ ТЕКУЧЕЙ СРЕДЫ, А ЗАТЕМ УЧИТЫВАЕМ РАЗЛИЧНЫЕ ФАКТОРЫ, ТАКИЕ КАК ВЯЗКОСТЬ?



ДА. ИЗУЧИВ ВЯЗКОСТЬ, МЫ СМОЖЕМ ГЛУБЖЕ ПОНЯТЬ СВОЙСТВА ТЕКУЧИХ СРЕД, РЕАЛЬНО СУЩЕСТВУЮЩИХ ВОКРУГ НАС. КРОМЕ ТОГО, ВИХРИ, ВОЗНИКАЮЩИЕ ВНУТРИ ТЕЧЕНИЯ, ТАКЖЕ ЯВЛЯЮТСЯ ОСОБЕННОСТЬЮ ВЯЗКОЙ ТЕКУЧЕЙ СРЕДЫ.



Шар или цилиндр

Шар или цилиндр

Вид течения вокруг шара или цилиндра

Источник:

«Простейшая книга о механике текучих сред», Кубота Рёноске, изд. Nikkan Kogyo Shimbunsha, 2007



ДА, КОГДА МЫ ПРИ ПОМОЩИ СИЛЬНОЙ МУКИ НАБЛЮДАЛИ ТЕЧЕНИЕ ВНУТРИ БАМБУКОВОГО ЖЁЛОБА, ТАМ НА САМОМ ДЕЛЕ ОБРАЗОВАЛИСЬ ЗАВИХРЕНИЯ. И РЕКА, И ТЕЧЕНИЕ ВНУТРИ БАМБУКОВОГО ЖЁЛОБА, И ДАЖЕ ОКРУЖАЮЩИЙ НАС ВОЗДУХ НА САМОМ ДЕЛЕ ЯВЛЯЮТСЯ ВЯЗКИМИ ТЕКУЧИМИ СРЕДАМИ. ВЫХОДИТ, ЧТО ИМЕННО "ВЯЗКАЯ ТЕКУЧАЯ СРЕДА" - ЭТО НАСТОЯЩАЯ, СУЩЕСТВУЮЩАЯ В РЕАЛЬНОСТИ ТЕКУЧАЯ СРЕДА!

Что такое градиент скорости?

(Закон вязкости Ньютона)



* Чай «улун»: популярный в Японии китайский полуферментированный чай (прим. перев.)



ПОПРОБУЙТЕ ВСПОМНИТЬ.
ПРИМЕМ ЗА y РАССТОЯНИЕ ОТ ВНУТРЕННЕЙ СТЕНКИ БАМБУКОВОГО ЖЁЛОБА И ЗА u - СКОРОСТЬ В СООТВЕТСТВУЮЩЕЙ ПОЗИЦИИ.

Направление течения

Сила вязкости (чем ближе к стенке, тем больше)

Центр бамбукового жёлоба

Внутренняя стенка бамбукового жёлоба

СКОРОСТЬ РАВНА 0 М/С У ВНУТРЕННЕЙ СТЕНКИ И ВОЗРАСТАЕТ ПРИ УДАЛЕНИИ ОТ НЕЁ.

ОТ ЦЕНТРА БАМБУКОВОГО ЖЁЛОБА ДО ВНУТРЕННЕЙ СТЕНКИ РАБОТАЕТ ТОРМОЗ В ВИДЕ СИЛЫ ВЯЗКОСТИ, И ТАКОЕ ВПЕЧАТЛЕНИЕ, ЧТО У ВНУТРЕННЕЙ СТЕНКИ ЭТОТ ТОРМОЗ РАБОТАЕТ СИЛЬНЕЕ, НЕ ТАК ЛИ?

ТАК ЖЕ, КАК И НА РЕКЕ. ВБЛИЗИ ОТ БЕРЕГА ВОДА ТЁЧЁТ МЕДЛЕННО, А ВДАЛИ - ТАК БЫСТРО, ЧТО ДАЖЕ СТРАШНО СТАНОВИТСЯ.

ЗНАЧИТ, ВПЛОТНУЮ К ВНУТРЕННЕЙ СТЕНКЕ СКОРОСТИ НЕТ, А ПРИ УДАЛЕНИИ ОТ НЕЁ СКОРОСТЬ УВЕЛИЧИВАЕТСЯ.

ПУСТЬ ДЛЯ НЕКОТОРОГО РАССТОЯНИЯ y СКОРОСТЬ РАВНА u . ПРОДИФФЕРЕНЦИРОВАВ И ПО y , МЫ НАЙДЕМ ОТНОШЕНИЕ du/dy , КОТОРОЕ НАЗЫВАЕТСЯ...

du/dy

СКРЫТЬ

...«ГРАДИЕНТОМ СКОРОСТИ»!

ЕСЛИ ИЗОБРАЗИТЬ du И dy НА ГРАФИКЕ, ТО ОНИ БУДУТ ВЫГЛЯДЕТЬ ВОТ ТАК.

ДИФФЕРЕНЦИРОВАНИЕ - ЭТО ЗВУЧИТ СЛОЖНО, НО НА САМОМ ДЕЛЕ БУКВА d - ЭТО ТО ЖЕ САМОЕ, ЧТО Δ («ДЕЛЬТА») В СМЫСЛЕ МАЛОСТИ. ДРУГИМИ СЛОВАМИ, ЕСЛИ СМЕСТИТЬСЯ ПО ОСИ y НА МАЛОЕ РАССТОЯНИЕ Δy , ТО СКОРОСТЬ ИЗМЕНИТСЯ НА ВЕЛИЧИНУ Δu .

Если сместиться на малое расстояние dy , скорость изменится на величину du

Внутренняя стенка бамбукового жёлоба x

ДАЛЕЕ, СИЛА ВЯЗКОСТИ ТЕКУЧЕЙ СРЕДЫ ГЛУБОКО ВЗАИМОСВЯЗАНА С ГРАДИЕНТОМ СКОРОСТИ.

ЧПОК

ЭКИ-САН, КАК ТЫ ДУМАЕШЬ, ПОЧЕМУ?

ПОЧЕМУ... ПОЧЕМУ?

ОТВЕТ СОДЕРЖИТСЯ ВОТ НА ЭТОМ ГРАФИКЕ.

СРАВНИТЕ ДВА ГРАДИЕНТА СКОРОСТИ: (А) И (В)

ДЛИНА dy ВЫБРАНА ОДИНАКОВОЙ КАК В (А), ТАК И В (В), ОДНАКО, КАК ВИДИТЕ, ДЛИНЫ du ОКАЗАЛИСЬ РАЗНЫМИ.

du ДЛЯ (А) ПОЛУЧАЕТСЯ ДЛИННЕЕ, ЧЕМ du ДЛЯ (В).



ЗНАЧИТ, ВБЛИЗИ ОТ СТЕНКИ ГРАДИЕНТ СКОРОСТИ БУДЕТ БОЛЬШЕ, ПОНЯТНО?!

А, ТОЧНО!

ВЕДЬ ХОТЯ dy ОДИНАКОВЫ, du БОЛЬШЕ В (А), ЧЕМ В (В).

ЧЕМ БОЛЬШЕ РАЗНОСТЬ СКОРОСТЕЙ, ДРУГИМИ СЛОВАМИ, ЧЕМ БЛИЖЕ К СТЕНКЕ, ТЕМ БОЛЬШЕ СТАНОВИТСЯ СИЛА НАШЕЙ ВРЕДИНЫ.

Сила вязкости мала

Сила вязкости велика

ТО ЕСТЬ ВОЗРАСТАЕТ СИЛА ВЯЗКОСТИ?

Близко к внутренней стенке

Большой градиент скорости

Большая разность скоростей

Большая сила вязкости!

СИЛА ВЯЗКОСТИ И ГРАДИЕНТ СКОРОСТИ НА САМОМ ДЕЛЕ ГЛУБОКО ВЗАИМОСВЯЗАНЫ!

ПОНЯТНО!

С ВАШЕГО ПОЗВОЛЕНИЯ, ОПИШУ ЭТО ПОТОЧНЕЕ.

Все мы – братья и сёстры!

ЕСТЬ ТАКОЕ ПОНЯТИЕ – «ВЯЗКОСТНОЕ НАПРЯЖЕНИЕ», ВЫРАЖАЮЩЕЕ СИЛУ ВЯЗКОСТИ, ДЕЙСТВУЮЩУЮ НА ЕДИНИЦУ ПЛОЩАДИ (1 М²).

Вязкостное напряжение [Па]

Сила вязкости [Н]

Полное давление [Н]

Давление [Па]

Сила вязкости

Вязкостное напряжение

Сила вязкости

Полное давление

Давление

Полное давление

Давление

Давайте жить дружно!

Младший брат

Старший брат

Старшая сестра

Младшая сестра

ЯСНО. ОНИ В ТАКИХ ЖЕ ОТНОШЕНИЯХ, КАК ПОЛНОЕ ДАВЛЕНИЕ И ДАВЛЕНИЕ (СМ. СТР. 19).

* В русском варианте становится непонятно, почему «братья и сёстры». Дело в том, что японские названия всех четырёх величин заканчиваются иероглифом «сила», и здесь обыгрывается, что все они из одной семьи по фамилии Сила. (прим. перев.)

ВЯЗКОСТНОЕ НАПРЯЖЕНИЕ ПРИНЯТО ОБОЗНАЧАТЬ ГРЕЧЕСКОЙ БУКВОЙ τ (ТАУ), А ЕГО ЕДИНИЦЕЙ ИЗМЕРЕНИЯ ЯВЛЯЕТСЯ ПА=Н/М², ТАК ЖЕ, КАК ДЛЯ ДАВЛЕНИЯ.

Сила вязкости

Единица измерения = Н

Вязкостное напряжение = τ

Единица измерения = Па

ПРИ ЭТОМ НЕОБХОДИМО ПОМНИТЬ, ЧТО ЕДИНИЦЕЙ ИЗМЕРЕНИЯ СИЛЫ ВЯЗКОСТИ ЯВЛЯЕТСЯ Н.

ДАЛЕЕ, ФОРМУЛА ВЯЗКОСТНОГО НАПРЯЖЕНИЯ ВЫГЛЯДИТ ВОТ ТАК.

$\tau = \mu \frac{du}{dy}$

Вязкостное напряжение

Коэффициент вязкости

Градиент скорости

ЭТО СООТНОШЕНИЕ НАЗЫВАЮТ «ЗАКОНОМ ВЯЗКОСТИ НЬЮТОНА»!

ЯСНО. ОДИН ВЗГЛЯД НА ЭТУ ФОРМУЛУ ПОЗВОЛЯЕТ ПОНЯТЬ, ЧТО ВЯЗКОСТНОЕ НАПРЯЖЕНИЕ ПРОПОРЦИОНАЛЬНО ГРАДИЕНТУ СКОРОСТИ.

ОЙ, А ЧТО ЭТО ЗА БУКВА ТАМ СТОИТ В НАЧАЛЕ? Я ТАКОУ РАНЫШЕ НИКОГДА НЕ ВИДЕЛА!

ЭТО μ (МЮ), КОТОРОЙ ОБОЗНАЧАЮТ КОЭФФИЦИЕНТ ВЯЗКОСТИ. СЕЙЧАС Я ВСЁ ОБЪЯСНЮ!

Насколько это густо?

(Коэффициент вязкости и коэффициент кинематической вязкости)

КОЭФФИЦИЕНТ ВЯЗКОСТИ ВЫРАЖАЕТ СТЕПЕНЬ ВЯЗКОСТИ ТЕКУЧЕЙ СРЕДЫ.

ЧВОК, ЧВОК

ЕДИНИЦА ИЗМЕРЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ВЯЗКОСТИ - ЭТО ПА·С (ПАСКАЛЬ-СЕКУНДА) = Н·С/М².

← Единица измерения превращается в Па·с!

$$\mu = \frac{\tau \text{ [Pa]}}{du/dy \left[\frac{m}{s} \cdot \frac{1}{m} \right]}$$

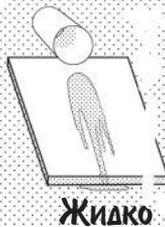
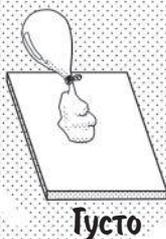
КАК ВИДИТЕ, ЕСЛИ ПРЕОБРАЗОВАТЬ НЕДАВНЮЮ ФОРМУЛУ, ТО ЕДИНИЦЕЙ ИЗМЕРЕНИЯ ОКАЖЕТСЯ ПА·С.

КАЖДАЯ ИЗ ТЕКУЧИХ СРЕД ХАРАКТЕРИЗУЕТСЯ ОПРЕДЕЛЁННЫМ ЗНАЧЕНИЕМ КОЭФФИЦИЕНТА ВЯЗКОСТИ, ЧЕМ ОН БОЛЬШЕ, ТЕМ ГУЩЕ ТЕКУЧАЯ СРЕДА.

НАПРИМЕР, У МАЙОНЕЗА ОН РАВЕН 8 ПА·С, А У ВОДЫ ПРИ 25°C - ВСЕГО 0,00089 ПА·С.

КРОМЕ ТОГО, КОЭФФИЦИЕНТ ВЯЗКОСТИ СНИЖАЕТСЯ ПРИ ПОВЫШЕНИИ ТЕМПЕРАТУРЫ.

ТАК, ПИЩЕВОЕ МАСЛО В ОБЫЧНОМ СОСТОЯНИИ ГУСТОЕ, НО ЕСЛИ НАЛИТЬ ЕГО НА ГОРЯЧУЮ СКОВОРОДУ, ТО ВЫ УВИДИТЕ, ЧТО ОНО СТАНЕТ ЖИДКИМ.



А-а!

ШУРХ

КРОМЕ ТОГО, СУЩЕСТВУЕТ ЕЩЁ "КОЭФФИЦИЕНТ КИНЕМАТИЧЕСКОЙ ВЯЗКОСТИ", ОБОЗНАЧАЕМЫЙ ГРЕЧЕСКОЙ БУКВОЙ ν (НЮ).

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} = \frac{\text{Коэффициент вязкости}}{\text{Плотность}}$$

КОЭФФИЦИЕНТ КИНЕМАТИЧЕСКОЙ ВЯЗКОСТИ - ЭТО ФИЗИЧЕСКАЯ ВЕЛИЧИНА, КОТОРУЮ НАХОДЯТ ДЕЛЕНИЕМ КОЭФФИЦИЕНТА ВЯЗКОСТИ НА ПЛОТНОСТЬ ТЕКУЧЕЙ СРЕДЫ. ЕГО ЕДИНИЦА ИЗМЕРЕНИЯ - [М²/С]. КОЭФФИЦИЕНТ КИНЕМАТИЧЕСКОЙ ВЯЗКОСТИ ЕЩЁ ПОЯВИТСЯ В МОЁМ РАССКАЗЕ, ПОЭТОМУ ЗАПОМНИТЕ ХОРОШЕНЬКО!

Великий закон, выражающий свойства течения?! (число Рейнольдса)

ЭТО БЫЛО 100 ЛЕТ
НАЗАД,...



...КОГДА АНГЛИЙСКИЙ УЧЁНЫЙ
РЕЙНОЛЬДС СДЕЛАЛ
ОДНО ОТКРЫТИЕ.

ЭТО БЫЛО ЧИСЛО
РЕЙНОЛЬДСА!

ЧИСЛО РЕЙНОЛЬДСА НЕ ИМЕЕТ
ЕДИНИЦ ИЗМЕРЕНИЯ, ОНО ВЫРАЖАЕТ
ОТНОШЕНИЕ ОДНОЙ СИЛЫ К ДРУГОЙ.

А... РАЗ ЭТО ОТНОШЕНИЕ,
ТОГДА ПОНЯТНО, ЧТО
У НЕГО, КАК И У ОТНО-
СИТЕЛЬНОЙ ПЛОТНОСТИ,
НЕТ ЕДИНИЦ
ИЗМЕРЕНИЯ.
НО ЧТО ЭТО ЗА
"ОДНА СИЛА" И
"ДРУГАЯ СИЛА"?

Скорее
объясни!

ХИ-ХИ-ХИ...

"ОДНА СИЛА" И
"ДРУГАЯ СИЛА" ЧИСЛА РЕЙ-
НОЛЬДСА - ЭТО СИЛА ИНЕРЦИИ
(СИЛА, СВЯЗАННАЯ СО СКОРО-
СТЬЮ) И СИЛА ВЯЗКОСТИ (СИЛА,
СВЯЗАННАЯ С КОЭФФИЦИЕНТОМ
ВЯЗКОСТИ)

ЯВЛЯЯСЬ ОТНОШЕНИЕМ
ЭТИХ ДВУХ СИЛ, ЧИСЛО
РЕЙНОЛЬДСА МОЖЕТ
БЫТЬ ЗАПИСАНО ВОТ ТАК:

$$Re = \frac{\text{Сила инерции}}{\text{Сила вязкости}}$$

ГОВОРЯ КОНКРЕТНЕЕ, ЧИСЛО РЕЙНОЛЬДСА
МОЖНО НАЙТИ ВОТ ПО ЭТОЙ ФОРМУЛЕ!

$$Re = \frac{U \times d}{\nu} = \frac{\text{Характерная скорость} \times \text{Характерная длина}}{\text{Коэффициент кинематической вязкости}}$$

ясно -
число РЕЙНОЛЬДСА
пишется как Re, да?



Рассматривая число Рейнольдса для этих измерений, получим:

$$Re = \frac{U \times d}{\nu}$$

Средняя скорость*
молочного коктейля

× Диаметр
соломинки

Коэффициент кинематической
вязкости молочного коктейля

Это тождественно следующему:

$$Re = \frac{\text{Сила инерции молочного коктейля}}{\text{Сила вязкости молочного коктейля}}$$

ЕСЛИ ЧИСЛО РЕЙНОЛЬДСА МАЛО, ТО ТЕЧЕНИЕ ГУСТОЕ - СИЛА ВЯЗКОСТИ В НЁМ ПРЕОБЛАДАЕТ НАД СИЛОЙ ИНЕРЦИИ.

ЕСЛИ ЧИСЛО РЕЙНОЛЬДСА ВЕЛИКО, ТО ТЕЧЕНИЕ ЖИДКОЕ - СИЛА ИНЕРЦИИ В НЁМ ПРЕОБЛАДАЕТ НАД СИЛОЙ ВЯЗКОСТИ.

ПРИ НЕИЗМЕННОМ ДИАМЕТРЕ СОЛОМИНКИ, ЧЕМ БОЛЬШЕ СКОРОСТЬ ТЕКУЧЕЙ СРЕДЫ, ТЕМ ЧИСЛО РЕЙНОЛЬДСА БОЛЬШЕ, А ЧЕМ МЕНЬШЕ СКОРОСТЬ ТЕКУЧЕЙ СРЕДЫ, ТЕМ ЧИСЛО РЕЙНОЛЬДСА МЕНЬШЕ.



*Средняя скорость (= средняя скорость текучей среды) объясняется на стр. 119

2. ЛАМИНАРНОЕ И ТУРБУЛЕНТНОЕ ТЕЧЕНИЕ

Наблюдаем за дымом (Ламинарное течение и турбулентное течение)

КСТАТИ, ЭКИ-САН,
ВОТ ЭТО ТВОЁ БАРАХ...
ОККУЛЬТНЫЕ ВЕЩИЧКИ.

МОЖНО
Я КОЕ-ЧЕМ ИЗ НИХ
ВОСПОЛЬЗУЮСЬ?

Не трогать!
Опасно!

Вещи
Эки

Ароматиче-
ские палочки!

ОЙ! МОЖНО, КОНЕЧНО, НО ЭТИ
АРОМАТИЧЕСКИЕ ПАЛОЧКИ
ВЫЗЫВАЮТ ЗЛЫХ ДУХОВ!

БУДЬ ОСТОРОЖЕН,
СИРАСУИ!

ВРОДЕ ВЫГЛЯДЯТ
КАК ОБЫЧНЫЕ
АРОМАТИЧЕСКИЕ
ПАЛОЧКИ.

Ты не права!
Они вызывают
злых духов!

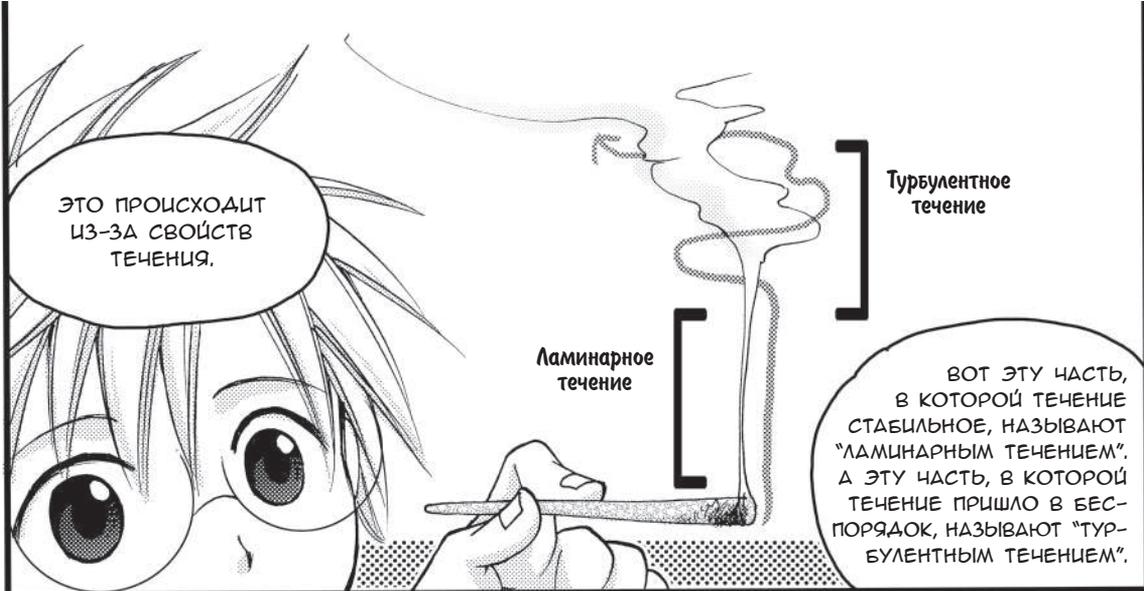
ИТАК, СМОТРИТЕ.

ОБРАТИТЕ
ВНИМАНИЕ НА ДЫМ
ОТ АРОМАТИЧЕСКОЙ
ПАЛОЧКИ.

СНАЧАЛА ОН ПОДНИМАЕТСЯ
ПРЯМО ВВЕРХ, НО ПО ПУТИ
ПРИХОДИТ В БЕСПОРЯДОК,
НЕ ТАК ЛИ?

ОЙ, ЗЛЫЕ ДУХИ
ПРИШЛИ!
ЭТО ОПАСНО!
ДАВАЙТЕ ПРЕКРАТИМ!

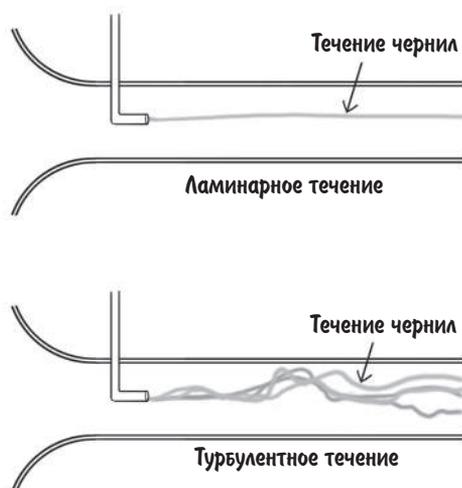
ДА И
С ОБЫЧНОЙ ПРОТИ-
ВОМОСКИТНОЙ СПИ-
РАЛЬНО ПРОИСХОДИТ
ТО ЖЕ САМОЕ.



💧 Льём чернила (опыт Рейнольдса)

Английский физик Рейнольдс предположил, что тип течения сильно отличается в зависимости от того, является оно медленным или быстрым, и назвал беспорядочное течение «турбулентным».

Рейнольдс провёл эксперимент, в котором жидкости с разным коэффициентом вязкости текли в трубках разного диаметра и с разной скоростью текучей среды.



В случаях, когда скорость текучей среды была мала, или коэффициент вязкости жидкости был большой, налитые в трубку чернила текли прямо, как нитка.

Однако когда скорость текучей среды возростала, или диаметр трубки был больше, или коэффициент вязкости был меньше, течение внутри трубки изменялось, начиная интенсивно перемешиваться.

Рейнольдс обнаружил, что границей между ламинарным и турбулентным течениями является число, равное примерно 2320. Это число называют критическим числом Рейнольдса для трубы.

Благодаря опыту Рейнольдса стало понятно, что состояние течения изменяется, когда соотношение силы инерции и силы вязкости, действующих на текучую среду, превышает определённое значение.

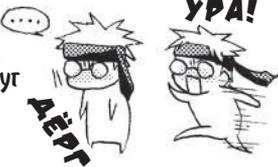
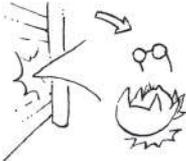
Ой, оно пришло в беспорядок (Свойства турбулентного течения)

ТУРБУЛЕНТНОЕ ТЕЧЕНИЕ ОЗНАЧАЕТ СОСТОЯНИЕ С БОЛЬШИМ ЗНАЧЕНИЕМ ЧИСЛА РЕЙНОЛЬДСА. ДРУГИМИ СЛОВАМИ, СИЛА ИНЕРЦИИ МАЛЫШЕЙ-ЧАСТИЦ ТЕКУЧЕЙ СРЕДЫ ПРЕВЫШАЕТ СИЛУ ВЯЗКОСТИ, ПОЭТОМУ ОНИ ДВИЖУТСЯ СВОБОДНО.

Свободный режим!

ТУРБУЛЕНТНОЕ ТЕЧЕНИЕ, ПРИ КОТОРОМ ЧАСТИЦЫ РАБОЧЕЙ СРЕДЫ "ЧУВСТВУЮТ СЕБЯ СВОБОДНО", ИМЕЕТ СЛЕДУЮЩИЕ ОСОБЕННОСТИ.

Особенности турбулентного течения

3-х мерное течение	Как шаткая походка пьяного	
Нестационарное течение	Как пьяный, который вдруг то побежит, то встанет	
Внутренние текучие среды интенсивно перемешиваются	Как пьяный, пристающий к прохожим	
Вблизи стенки градиент скорости увеличивается, поэтому вязкостное напряжение у поверхности стены возрастает	Как пьяный, налетевший на стену и ощутивший её «сопротивление»	
Вместе с увеличением расхода текучей среды растут потери давления*	Если пьяный побежит, то он быстро запыхается (велика потеря энергии)	

* Потери давления: потеря энергии между двумя точками. Подробности см. на стр. 134.

ДА, ОН ТОЖЕ ПРИШЁЛ В ПОЛНЫЙ БЕСПОРЯДОК.

Ой!

ПОХОЖЕ, ЧТО СИЛА ВЯЗКОСТИ, ДЕЙСТВУЮЩАЯ НА ОБЫЧНО СПОКОЙНОГО СИРАЦИ ТАК ОСЛАБЛА, ЧТО ОН ПРЕВЫСИЛ КРИТИЧЕСКОЕ ЧИСЛО РЕЙНОЛЬДСА!

ДА ЛАДНО ТЕБЕ, СТАРОСТА. ХЕ-ХЕ-ХЕ.

3. ЛАМИНАРНОЕ ТЕЧЕНИЕ ВНУТРИ ТРУБЫ

Течение внутри соломинки (Средняя скорость текучей среды и распределение скоростей текучей среды)

ИТАК, ТЕПЕРЬ МЫ
ПОГОВОРИМ О ТРУБЕ,
КОТОРАЯ ЯВЛЯЕТСЯ
КАНАЛОМ ТЕЧЕНИЯ.

ДА, ТРУБЫ - ЭТО ВОДОПРОВОД,
ГАЗОСНАБЖЕНИЕ.
ПО НИМ ПОСТАВЛЯЮТ САМОЕ
НЕОБХОДИМОЕ НАМ ДЛЯ ЖИЗНИ.

ЭТО ДОВОЛЬНО
ИНТЕРЕСНАЯ ТЕМА.



В САМОМ ДЕЛЕ, ПРОРЫВ ВОДОПРОВОДНОЙ ТРУБЫ - ЭТО УЖАСНАЯ АВАРИЯ. ПРАВАА, МНЕ С ЭТИМ СТАЛКИВАТЬСЯ НЕ ПРИХОДИЛОСЬ.

ЧТО-ТО МЕНЯ ТРУБЫ
НЕ ОСОБО ВОЛНУЮТ.



НУ ДАВАЙ, ПЕЙ, ПЕЙ!

ДАВАЙТЕ СЕЙЧАС РАССМОТРИМ
СОСТОЯНИЕ ВНУТРИ ЭТОЙ СОЛОМИНКИ
С ТОЧКИ ЗРЕНИЯ МЕХАНИКИ ТЕКУЧИХ СРЕД!*

ЭКИ-САН, ЧТО ТЫ
ГОВОРИШЬ? ВЕДЬ ЭТА
ТВОЯ СОЛОМИНКА - ТОЖЕ
САМАЯ НАСТОЯЩАЯ ТРУБА.

НА ЭТОТ РАЗ МЫ БУДЕМ
ИЗУЧАТЬ МЕХАНИКУ ТЕКУЧИХ
СРЕД С ПОМОЩЬЮ ЭТОЙ
СОЛОМИНКИ!

A-я

ТЕЧЕНИЕ ВНУТРИ СОЛОМИНКИ (ВНУТРИ ТРУБЫ) ХАРАКТЕРИЗУЕТСЯ ТРЕМЯ ОЧЕНЬ ВАЖНЫМИ СВОЙСТВАМИ: СКОРОСТЬЮ ТЕКУЧЕЙ СРЕДЫ, РАСХОДОМ ТЕКУЧЕЙ СРЕДЫ И ЭНЕРГИЕЙ.

СЕЙЧАС Я ИХ ВСЕ
ОПИШУ ПО ОЧЕРЕДИ!

* Ниже рассматривается случай вертикально расположенной соломинки. Хотя в этом случае на текучую среду внутри действует сила тяжести, здесь она не будет приниматься во внимание.

СНАЧАЛА О ПЕРВОМ
ИЗ НИХ - О СКОРОСТИ
ТЕКУЧЕЙ СРЕДЫ!

Скорость текучей среды

МОЛОЧНЫЙ КОКТЕЙЛЬ,
КОТОРЫЙ ТЫ, ЭКИ-САН,
ПЬЕШЬ, ВХОДИТ СНИЗУ
СОЛОМНКИ
И ОБЯЗАТЕЛЬНО
ПОДНИМЕТСЯ ДО РТА,
НЕ ТАК ЛИ?

ИЛИ ЖЕ ОН ИНОГДА
ИСЧЕЗАЕТ ПО ПУТИ?

НЕТ, НЕ ИСЧЕЗАЕТ.

ИНАЧЕ ЭТО БЫЛО
БЫ ПОХИЩЕНИЕМ
ПРИЗРАКАМИ.

ЧТО?!
У МЕНЯ
"ДЕЖАВЮ"?!

ЭТО ЖЕ
УРАВНЕНИЕ НЕПРЕРЫВНОСТИ*!

ИМЕННО!

ПРОДОЛЖАЙ
ПИТЬ, ЭКИ-САН!

* см. на стр. 66-67

И ДЛЯ "РЕАЛЬНЫХ ТЕКУЧИХ СРЕД", ОБЛАДАЮЩИХ ВЯЗКОСТЬЮ, И ДЛЯ "ИДЕАЛЬНЫХ ТЕКУЧИХ СРЕД", У КОТОРЫХ НЕТ ВЯЗКОСТИ, ИЗ УРАВНЕНИЯ НЕПРЕРЫВНОСТИ СЛЕДУЕТ, ЧТО ПРИ ТЕЧЕНИИ ВНУТРИ СОЛОМНКИ СРЕДНЯЯ СКОРОСТЬ ТЕКУЧЕЙ СРЕДЫ U ПОСТОЯННА В ЛЮБОМ ПОПЕРЕЧНОМ СЕЧЕНИИ.

В любом
поперечном
сечении средняя
скорость текущей
среды U
постоянна!

Подробнее о вязких (реальных) и идеальных текучих средах см. на стр. 104

СРЕДНЯЯ СКОРОСТЬ ТЕКУЧЕЙ СРЕДЫ ОДНА И ТА ЖЕ В ЛЮБОМ ПОПЕРЕЧНОМ СЕЧЕНИИ. А КАК БЫТЬ С ИЗМЕНЕНИЯМИ СКОРОСТИ ВНУТРИ БАМБУКОВОГО ЖЕЛОБА**? КАК НАСЧЁТ ВЯЗКОСТНОГО НАПРЯЖЕНИЯ? И ГРАДИЕНТА СКОРОСТИ?

АА, ЭТО ЧУТЬ-ЧУТЬ СЛОЖНОВАТО.

НА САМОМ ДЕЛЕ, ЗАДЕСЬ НЕОБХОДИМО УСВОИТЬ СЛЕДУЮЩЕЕ!

** см. на стр. 107

СКОРОСТЬ ТЕКУЧЕЙ СРЕДЫ И СРЕДНЯЯ СКОРОСТЬ ТЕКУЧЕЙ СРЕДЫ - ЭТО РАЗНЫЕ ПОНЯТИЯ! ВНУТРИ ВЯЗКОЙ ТЕКУЧЕЙ СРЕДЫ СКОРОСТИ РАЗЛИЧАЮТСЯ В ПРЕДЕЛАХ ОДНОГО И ТОГО ЖЕ ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ. СРЕДНЯЯ СКОРОСТЬ ТЕКУЧЕЙ СРЕДЫ - ЭТО УСРЕДНЁННОЕ ЗНАЧЕНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СКОРОСТЕЙ ТЕКУЧЕЙ СРЕДЫ В ПРЕДЕЛАХ ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ.

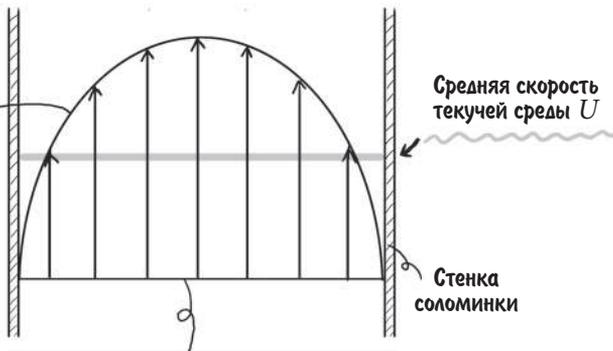
Здесь!

ВЫ ВСЁ ПОЙМЁТЕ, ЕСЛИ РАССМОТРИТЕ ВОТ ЭТУ ЧАСТЬ В УВЕЛЧЕННОМ ВИДЕ!

АГА!

АА, АА!
Я ПОНЯЛА, В ЧЁМ ТУТ ДЕЛО.

Распределение скоростей
текучей среды u



Одно поперечное сечение соломинки

У СТЕНКИ

ТЕЧЕНИЕ МЕДЛЕННОЕ, А В СЕРЕДИНЕ - БЫСТРОЕ. ДЕЙСТВИТЕЛЬНО, В ОТДЕЛЬНО ВЗЯТОМ ПОПЕРЕЧНОМ СЕЧЕНИИ ЗАДЕСЬ ВСЁ ТАК ЖЕ, КАК ДЛЯ СЛУЧАЯ С БАМБУКОВЫМ ЖЁЛОБОМ.

НАКОНЕЦ, ФОРМУЛА, ОПИСЫВАЮЩАЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТЕЙ ТЕКУЧЕЙ СРЕДЫ В ТРУБЕ. ВЫГЛЯДИТ ВОТ ТАК!

СКРЯБ, СКРЯБ

$$u = -\frac{1}{4\mu} \frac{dp}{dx} (r_0^2 - r^2)$$

Ой!

ЧТО ЭТО?! СКОРОСТЬ u И КОЭФФИЦИЕНТ ВЯЗКОСТИ μ - ЭТО ПОНЯТНО... НО ЧТО ТАКОЕ ВСЕ ЭТИ dp , dx , r , r_0 ?

ВАМ!

ДА, ВЫГЛЯДИТ СЛОЖНОВАТО, НО НА САМОМ ДЕЛЕ ПРОСТО, ЕСЛИ РАССМОТРЕТЬ ВСЁ ПО ПОРЯДКУ. СЕЙЧАС Я ВАМ ВСЁ НЕ ТОРОПЯСЬ ОБЪЯСНЮ!

☹️ Поглядим пристально на формулу! (Течение с параболическим распределением)

$$u = - \frac{1}{4\mu} \frac{dp}{dx} (r_0^2 - r^2)$$



ПРЕЖДЕ ВСЕГО, ВНИМАНИЕ ПРИВЛЕКАЕТ ЧЛЕН dp/dx , НАПОМИНАЮЩИЙ ГРАДИЕНТ СКОРОСТИ du/dy . ОДНАКО ЗАЧЕМ НУЖЕН "МИНУС"? ГММ...



ТЫ НАБЛЮДАТЕЛЬНА, СТАРОСТА АКАНЭ. ЭТО НАЗЫВАЕТСЯ "ГРАДИЕНТОМ ДАВЛЕНИЯ". БУКВА d - ЭТО ТО ЖЕ САМОЕ, ЧТО Δ В СМЫСЛЕ МАЛОСТИ, ОНА ВЫРАЖАЕТ ВЕЛИЧИНУ ИЗМЕНЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ ПРИ СМЕНЕ ПОЛОЖЕНИЯ: ЕСЛИ ПРОАВИНУТЬСЯ ВАОЛЬ ОСИ x НА МАЛОЕ РАССТОЯНИЕ dx , ТО ДАВЛЕНИЕ ПОНИЗИТСЯ НА dp [ПА]. ТАК КАК dp/dx ЯВЛЯЕТСЯ ОТРИЦАТЕЛЬНОЙ ВЕЛИЧИНОЙ, В НАЧАЛЕ ВЫРАЖЕНИЯ СТАВЯТ ЗНАК "МИНУС", ЧТОБЫ ОНО СТАЛО ПОЛОЖИТЕЛЬНЫМ.



ПОНЯТНО.



ТЕПЕРЬ ПОГОВОРИМ ПРО r И r_0 . ПРЕДСТАВЬТЕ СЕБЕ СИТУАЦИЮ ВНУТРИ ТРУБЫ.



В САМОЙ СЕРЕДИНЕ СОЛОМИНКИ ПРОВОДИМ ОСЬ x , НАПРАВЛЕННУЮ ПО ТЕЧЕНИЮ. ОСЬ r ПРОВОДИМ ОТ ЦЕНТРА 0 В НАПРАВЛЕНИИ СТЕНКИ, А r_0 - ЭТО РАДИУС НАШЕЙ ТРУБЫ.

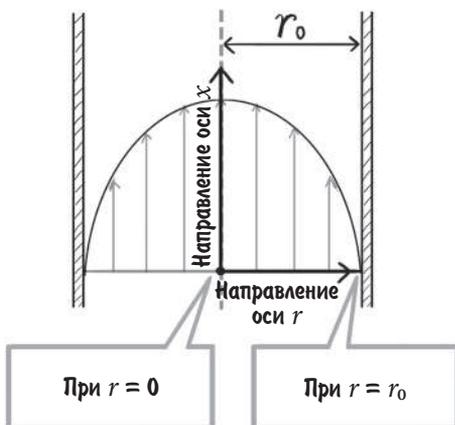


ЯСНО, ЯСНО.



$r = 0$ СООТВЕТСТВУЕТ ЦЕНТРУ СОЛОМИНКИ, НЕ ТАК ЛИ? ПРИ ЭТОМ СКОРОСТЬ, НАПРАВЛЕННАЯ ВДОЛЬ ОСИ x , БУДЕТ МАКСИМАЛЬНОЙ. ДРУГИМИ СЛОВАМИ, СКОРОСТЬ ТЕКУЧЕЙ СРЕДЫ БУДЕТ БОЛЬШОЙ.

$r = r_0$ СООТВЕТСТВУЕТ ПОЛОЖЕНИЮ У САМОЙ СТЕНКИ СОЛОМИНКИ, НЕ ТАК ЛИ? ПРИ ЭТОМ СКОРОСТЬ, НАПРАВЛЕННАЯ ВДОЛЬ ОСИ x , ОТСУТСТВУЕТ. ДРУГИМИ СЛОВАМИ, СКОРОСТИ ТЕКУЧЕЙ СРЕДЫ ЗДЕСЬ НЕ СУЩЕСТВУЕТ.



ДА, ДА, ПО ЭТОМУ РИСУНКУ ВСЁ ПОНЯТНО!



ДО МЕНЯ ДОШЛО. ЗНАЧИТ, ЭТА ФОРМУЛА – КВАДРАТИЧНАЯ ФУНКЦИЯ ОТ r . КРИВАЯ С БОЛЬШОЙ ВЫПУКЛОСТЬЮ ПОСЕРЕДИНЕ. ВЕДЬ ЭТО ЖЕ САМАЯ НАСТОЯЩАЯ ПАРАБОЛА.



ВОТ ИМЕННО! ЭТА ФОРМУЛА ПОКАЗЫВАЕТ, ЧТО СКОРОСТИ ТЕКУЧЕЙ СРЕДЫ В ТРУБЕ СООТВЕТСТВУЮТ ПАРАБОЛИЧЕСКОМУ РАСПРЕДЕЛЕНИЮ С МАКСИМУМОМ В ЦЕНТРЕ ТРУБЫ.

А ТАКОЕ ТЕЧЕНИЕ С ПАРАБОЛИЧЕСКИМ РАСПРЕДЕЛЕНИЕМ НАЗЫВАЮТ "ТЕЧЕНИЕМ ПУАЗЕЦЛЯ".

Какова природа таинственной силы? (Разность давлений)

ИЗ ФОРМУЛЫ ТАКЖЕ СЛЕДУЕТ, ЧТО
 ЕСЛИ ВЗЯТЬ ОДНО ПОПЕРЕЧНОЕ СЕЧЕНИЕ СОЛОМИНКИ, ТО В ЦЕНТРЕ СОЛОМИНКИ СКОРОСТЬ ТЕКУЧЕЙ СРЕДЫ БУДЕТ БЫСТРЕЕ, А У СТЕНКИ - МЕДЛЕННЕЕ.

ДА, ДА!



ПОСЛУШАЙ, СИРАИСИ,

У МЕНЯ ВОЗНИК ВОПРОС.



СТУК

ДА?

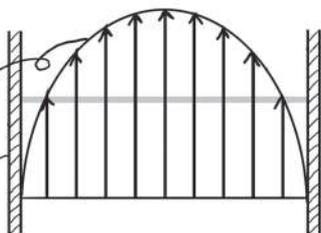
Вязкостное напряжение - это трение, препятствующее скорости, поэтому оно изображено действующим в противоположном направлении от скорости.

В центре - 0



Распределение скоростей текущей среды u

Стенка соломинки



Средняя скорость текущей среды U

ТО ЕСТЬ БУДЕТ ТАК, КАК НА ЭТОМ РИСУНКЕ.



ДО ЭТОГО ТЫ РАССКАЗАЛ О ТЕОРЕМЕ БЕРНУЛЛИ, А В СООТВЕТСТВИИ С НЕЙ ЭНЕРГИЯ ИДЕАЛЬНОЙ ТЕКУЧЕЙ СРЕДЫ БУДЕТ ОДИНАКОВА В ЛЮБОМ ПОПЕРЕЧНОМ СЕЧЕНИИ*.

ОДНАКО В СЛУЧАЕ ВЯЗКОЙ ТЕКУЧЕЙ СРЕДЫ, У ВНУТРЕННЕЙ СТЕНКИ СОЛОМИНКИ (ИЛИ ТРУБЫ) СКОРОСТЬ ТЕКУЧЕЙ СРЕДЫ ЗАМЕДЛЯЕТСЯ ПОД ДЕЙСТВИЕМ СИЛЫ ВЯЗКОСТИ, НАПРАВЛЕННОЙ ПРОТИВОПОЛОЖНО ТЕЧЕНИЮ.

* см. стр. 74.

ЭТО ОЗНАЧАЕТ, ЧТО СРЕДНЯЯ СКОРОСТЬ ТЕКУЧЕЙ СРЕДЫ U БУДЕТ СНИЖАТЬСЯ ПО МЕРЕ ПРИБЛИЖЕНИЯ ТЕЧЕНИЯ ВНУТРИ СОЛОМИНКИ К ВЫХОДУ ИЗ НЕЁ, НЕ ТАК ЛИ?

НО МНЕ КАЖЕТСЯ, ЧТО ЭТО ПРОТИВОРЕЧИТ ИЗУЧЕННОМУ ТОЛЬКО ЧТО ПРАВИЛУ: "СРЕДНЯЯ СКОРОСТЬ ТЕКУЧЕЙ СРЕДЫ U ПОСТОЯННА В ЛЮБОМ ПОПЕРЕЧНОМ СЕЧЕНИИ".



И ВПРЯМЬ! ДЕЙСТВИТЕЛЬНО СТРАННО!

ДА, НЕ ТАК ЛИ?

ОЧЕНЬ ПРОНИЦАТЕЛЬНЫЙ ВОПРОС.

ИТАК, ДАВАЙТЕ НЕ СПЕША ПРИСТУПИМ К РЕШЕНИЮ ЭТОЙ ЗАГАДКИ!

ДЛЯ НАЧАЛА НА ВСЯКИЙ СЛУЧАЙ УТОЧНО ПОЛОЖЕНИЕ "ВЕРХНЕГО ТЕЧЕНИЯ" И "НИЖНЕГО ТЕЧЕНИЯ".

Направление течения

Нижнее течение

Верхнее течение

УГУ...
ТО ЕСТЬ, НИЖНЕЕ ТЕЧЕНИЕ НАХОДИТСЯ БЛИЖЕ КО РТУ, А ВЕРХНЕЕ ТЕЧЕНИЕ - ДАЛЬШЕ ОТ НЕГО.

МОЛОЧНЫЙ КОКТЕЙЛЬ, КОТОРЫЙ ПЬЁТ ЭКИ-САН, ДВИЖЕТСЯ ИЗ СТАКАНЧИКА КО РТУ, ПОЭТОМУ НАПРАВЛЕНИЕ ТЕЧЕНИЯ БУДЕТ ВОТ ТАКОЕ.

ИТАК, ВОПРОС ДКАНЭ-САН МОЖНО ПРЕДСТАВИТЬ В ВИДЕ ТАКОГО РИСУНКА.

Вязкостное напряжение

Стенка соломинки

Распределение скоростей u в нижнем течении (близко ко рту)

Распределение скоростей u в верхнем течении (далеко ото рта)

НА САМОМ ДЕЛЕ, В ПОПЕРЕЧНЫХ СЕЧЕНИЯХ СОЛОМИНКИ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТЕЙ ТЕКУЧЕЙ СРЕДЫ ОДИНАКОВО. БОЛЕЕ ТОГО, СРЕДНИЕ СКОРОСТИ ТЕКУЧЕЙ СРЕДЫ ВЕЗДЕ РАВНЫ.

Средняя скорость текучей среды U

Нижнее течение

Средняя скорость текучей среды U

Верхнее течение

Стенка соломинки

АА! ВОТ ТАКИМ ОБРАЗОМ, СКОРОСТЬ ТЕКУЧЕЙ СРЕДЫ ДОЛЖНА БЫТЬ ТЕМ МЕНЬШЕ, ЧЕМ ДАЛЬШЕ ВНИЗ ПО ТЕЧЕНИЮ.

Это всё из-за тебя!

НО СТАРОСТА, ТВОЁ БЕСПОКОЙСТВО ПО ЭТОМУ ПОВОДУ ИЗЛИШНЕ.

ВСЁ УСТРОЕНО ТАК, ЧТО КОГДА ЭКИ-САН ПЬЁТ МОЛОЧНЫЙ КОКТЕЙЛЬ, СРЕДНЯЯ СКОРОСТЬ ТЕКУЧЕЙ СРЕДЫ В НАПРАВЛЕНИИ ТЕЧЕНИЯ НЕ УМЕНЬШАЕТСЯ!

КАК ТАК? ПОЧЕМУ?



НА САМОМ ДЕЛЕ, ПРИЧИНА ТОЙ ТАИНСТВЕННОЙ СИЛЫ, КОТОРАЯ УРАВНОВЕШИВАЕТ ВЯЗКОСНОЕ НАПРЯЖЕНИЕ И ЗАСТАВЛЯЕТ ТЕКУЩУЮ СРЕДУ ДВИГАТЬСЯ С ОДНОЙ И ТОЙ ЖЕ СКОРОСТЬЮ...

...СКРЫВАЕТСЯ ВО РТУ!



Что, вот здесь?

Эй, эки-сан!
ВТЯГИВАЙ КОКТЕЙЛЬ
ИЗО ВСЕЙ СИЛЫ!

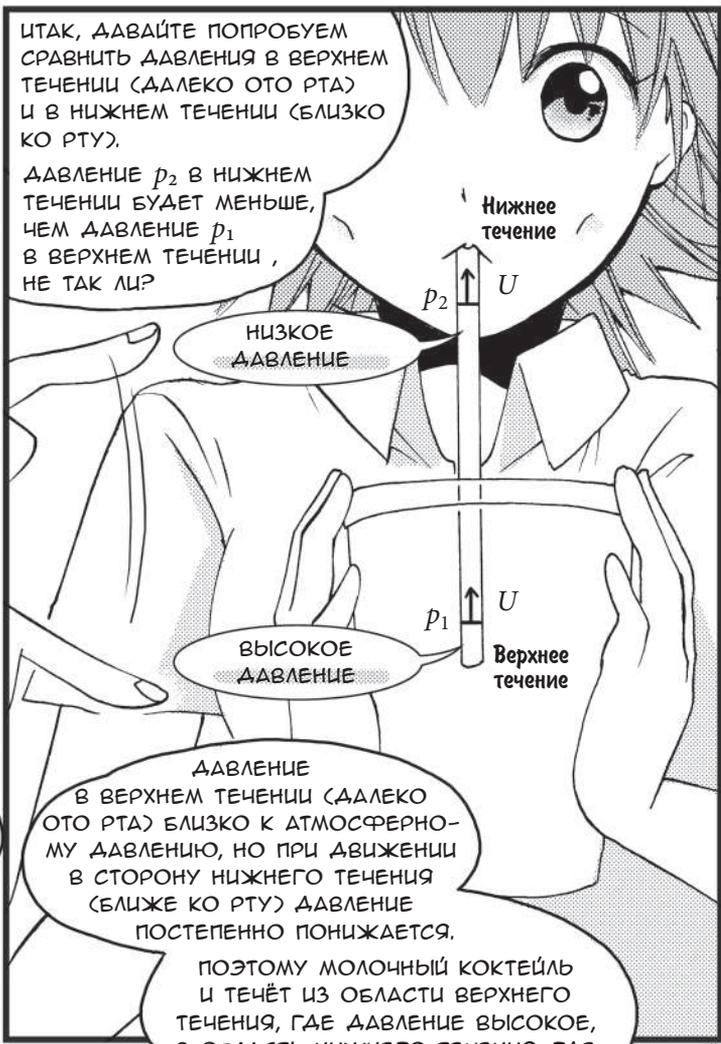


СЕЙЧАС ДАВЛЕНИЕ ВО РТУ ЭКИ-САН ПОНИЗИЛОСЬ, НЕ ТАК ЛИ?

ВЕДЬ ПИТЬ ИЗ СОЛОМКИ - ЭТО ЗНАЧИТ СОЗДАВАТЬ ВНУТРИ РТА ДАВЛЕНИЕ, КОТОРОЕ НИЖЕ АТМОСФЕРНОГО.

СЁРЬ...

ДА, ТОЧНО!



ИТАК, ДАВАЙТЕ ПОПРОБУЕМ СРАВНИТЬ ДАВЛЕНИЯ В ВЕРХНЕМ ТЕЧЕНИИ (ДАЛЕКО ОТО РТА) И В НИЖНЕМ ТЕЧЕНИИ (БЛИЗКО КО РТУ).

ДАВЛЕНИЕ p_2 В НИЖНЕМ ТЕЧЕНИИ БУДЕТ МЕНЬШЕ, ЧЕМ ДАВЛЕНИЕ p_1 В ВЕРХНЕМ ТЕЧЕНИИ, НЕ ТАК ЛИ?

НИЗКОЕ ДАВЛЕНИЕ

ВЫСОКОЕ ДАВЛЕНИЕ

ДАВЛЕНИЕ В ВЕРХНЕМ ТЕЧЕНИИ (ДАЛЕКО ОТО РТА) БЛИЗКО К АТМОСФЕРНОМУ ДАВЛЕНИЮ, НО ПРИ ДВИЖЕНИИ В СТОРОНУ НИЖНЕГО ТЕЧЕНИЯ (БЛИЖЕ КО РТУ) ДАВЛЕНИЕ ПОСТЕПЕННО Понижается.

ПОЭТОМУ МОЛОЧНЫЙ КОКТЕЙЛЬ И ТЕЧЁТ ИЗ ОБЛАСТИ ВЕРХНЕГО ТЕЧЕНИЯ, ГДЕ ДАВЛЕНИЕ ВЫСОКОЕ, В ОБЛАСТЬ НИЖНЕГО ТЕЧЕНИЯ, ГДЕ ДАВЛЕНИЕ НИЗКОЕ.



ЭТО ЖЕ РАЗНОСТЬ ДАВЛЕНИЙ Δp , О КОТОРОЙ ТЫ ГОВОРИЛ НА ЗАНЯТИИ, ПОСВЯЩЁННОМ ДАВЛЕНИЮ?

МОЛОЧНЫЙ КОКТЕЙЛЬ ПОДНИМАЕТСЯ ДО РТА ЭКИ БЛАГОДАРЯ РАЗНОСТИ ДАВЛЕНИЙ Δp !

* см. на стр.33



И БЛАГОДАРЯ ЭТОЙ РАЗНОСТИ ДАВЛЕНИЙ ВОЗНИКАЕТ "НАПРЯЖЕНИЕ РАЗНОСТИ ДАВЛЕНИЙ"! ИМЕННО В ЭТОМ ЗАКЛЮЧАЕТСЯ ПРИРОДА ТАИНСТВЕННОЙ СИЛЫ, УРАВНОВЕШИВАЮЩЕЙ ВЯЗКОСНОЕ НАПРЯЖЕНИЕ!

Принцип действия пипетки или спринцовки совершенно аналогичен!

Ого

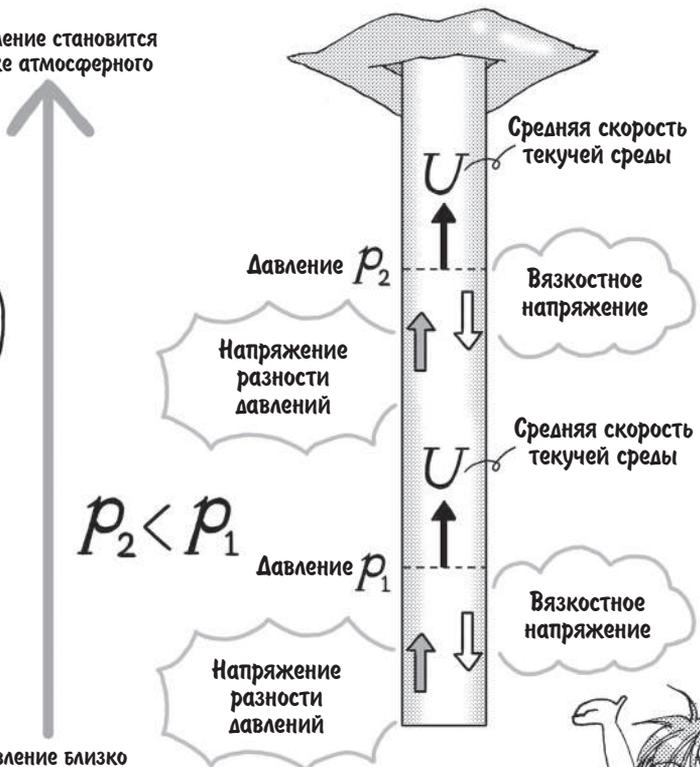


ИТОГОВЫЙ РИСУНОК БУДЕТ ВЫГЛЯДЕТЬ ВОТ ТАК.

Давление становится ниже атмосферного

ХОТЯ СКОРОСТИ ТЕКУЧЕЙ СРЕДЫ В ПОПЕРЕЧНОМ СЕЧЕНИИ РАСПРЕДЕЛЕНЫ НЕРАВНОМЕРНО, БЛАГОДАРЯ НАПРЯЖЕНИЮ РАЗНОСТИ ДАВЛЕНИЙ МОЛОЧНЫЙ КОКТЕЙЛЬ ДВИЖЕТСЯ С ПОСТОЯННОЙ СКОРОСТЬЮ.

ЗНАЧИТ, НАПРЯЖЕНИЕ РАЗНОСТИ ДАВЛЕНИЙ УРАВНОВЕШИВАЕТ ВЯЗКОСНОЕ НАПРЯЖЕНИЕ. И БЛАГОДАРЯ ЕМУ СРЕДНЯЯ СКОРОСТЬ ТЕКУЧЕЙ СРЕДЫ ОСТАЁТСЯ ПОСТОЯННОЙ В ЛЮБОМ ПОПЕРЕЧНОМ СЕЧЕНИИ, ДА?



Давление близко к атмосферному

Вглядываясь пристальнее.



ЗНАЧИТ, С СИЛОЙ ВТЯГИВАЯ КОКТЕЙЛЬ, Я ДЕЛАЮ ДАВЛЕНИЕ ВНУТРИ РТА НИЖЕ АТМОСФЕРНОГО, ТЕМ САМЫМ СОЗДАВАЯ "НАПРЯЖЕНИЕ РАЗНОСТИ ДАВЛЕНИЙ", КОТОРОЕ УРАВНОВЕШИВАЕТ "ВЯЗКОСНОЕ НАПРЯЖЕНИЕ".



Хочу выпить побольше!
(Связь между коэффициентом вязкости и расходом текучей среды)

ТЕПЕРЬ
ВТОРОЕ! О РАС-
ХОДЕ ТЕКУЧЕЙ
СРЕДЫ.

**Расход
текучей
среды**

ДАВАЙТЕ ПОДУМАЕМ,
КАК МНОГО МОЛОЧНОГО
КОКТЕЙЛЯ ВХОДИТ В РОТ
ЗА ЕДИНИЦУ ВРЕМЕНИ
(1 С)!

ДАВАЙТЕ ПОФАНТА-
ЗИРУЕМ. ПУСТЬ МЫ СЕЙ-
ЧАС НАХОДИМСЯ В ЖАР-
КОЙ ПУСТЫНЕ. У НАС ПЕ-
РЕСОХЛО В ГОРЛЕ, МЫ
УМИРАЕМ ОТ ЖАЖБЫ.

И ВРАГУ НАМ
ПРЕДЛОЖИЛИ НА ВЫБОР
МОЛОЧНЫЙ КОКТЕЙЛЬ
И ЧАЙ "УЛУН". ЧТО ВЫ
ВЫБЕРИТЕ?

ЧАЙ "УЛУН"!

КОНЕЧНО ЖЕ, ЧАЙ
"УЛУН". ВЕДЬ ОН МОМЕН-
ТАЛЬНО УВЛАЖНИТ МОЁ
ГОРЛО!

Уфф...

ДА, НЕ ТАК ЛИ?

ТАКИМ ОБРАЗОМ, ЕСЛИ МЫ ХОТИМ
ВЫПИТЬ БОЛЬШЕ В ЕДИНИЦУ ВРЕМЕНИ,
ТО ПОДСОЗНАТЕЛЬНО ВЫБИРАЕМ
ЧАЙ "УЛУН", ТО ЕСТЬ НАПИТОК С НИЗКИМ
КОЭФФИЦИЕНТОМ ВЯЗКОСТИ.

ПОТОМУ ЧТО МЫ ЗНАЕМ,
ЧТО НАПИТОК С НИЗКИМ
КОЭФФИЦИЕНТОМ ВЯЗКОСТИ
ПЬЁТСЯ БЫСТРЕЕ,
НЕ ТАК ЛИ?

АГА

ГЛЫК,
ГЛЫК

ДЕЙСТВИТЕЛЬНО, ЭТО ТАК
ЕСТЕСТВЕННО, ЧТО Я ДАЖЕ
НЕ ЗАДУМЫВАЛАСЬ.

ОДИН ВИД СПОРТИВНЫХ НАПИТКОВ
С БОЛЬШИМ КОЭФФИЦИЕНТОМ
ВЯЗКОСТИ ГОВОРИТ НАМ О ТОМ,
ЧТО ИХ ТРУДНО ПИТЬ.

ХА-ХА-ХА

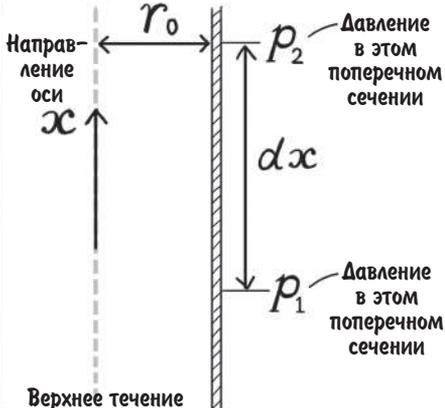
ПОУ

ИТАК, ЕСЛИ ПРИНЯТЬ РАДИУС СОЛОМКИ РАВНЫМ r_0 , ТО ОБЪЁМ МОЛОЧНОГО КОКТЕЙЛЯ, ВХОДЯЩИЙ В РОТ ЗА 1 С, Q [м³/с], МОЖНО ВЫРАЗИТЬ ВОТ ТАКОЙ ФОРМУЛОЙ!

ОНА МОЖЕТ ПОКАЗАТЬСЯ СЛОЖНОЙ НА ПЕРВЫЙ ВЗГЛЯД, НО ПОСМОТРИТЕ НА НЕЁ ВНИМАТЕЛЬНО!

$$Q = -\frac{\pi r_0^4}{8\mu} \left(\frac{dp}{dx} \right)$$

Нижнее течение



Стенка соломинки

π - ЭТО ОТНОШЕНИЕ ДЛИНЫ ОКРУЖНОСТИ К ЕЁ ДИАМЕТРУ, РАВНОЕ 3,14,
 r_0 - РАДИУС СОЛОМКИ,
 μ - КОЭФФИЦИЕНТ ВЯЗКОСТИ МОЛОЧНОГО КОКТЕЙЛЯ,
 dp/dx - ГРАДИЕНТ ДАВЛЕНИЯ.
 А ГРАДИЕНТ ДАВЛЕНИЯ - ЭТО ВЕЛИЧИНА, УКАЗЫВАЮЩАЯ ИЗМЕНЕНИЕ ДАВЛЕНИЯ ПРИ ПЕРЕМЕЩЕНИИ ВДОЛЬ ОСИ x НА МАЛОЕ РАССТОЯНИЕ dx .

КАЖЕТСЯ, ДО МЕНЯ ДОШЛО!

ПО ЭТОЙ ФОРМУЛЕ МОЖНО РАССЧИТАТЬ ОБЪЁМ МОЛОЧНОГО КОКТЕЙЛЯ, КОТОРЫЙ МОЖНО ВЫПИТЬ ЗА 1 С.

Здорово

ЕСЛИ КОЭФФИЦИЕНТ ВЯЗКОСТИ μ БОЛЬШОЙ, ТО РАСХОД ТЕКУЧЕЙ СРЕДЫ Q БУДЕТ МЕНЬШЕ. ИЗ ЭТОЙ ФОРМУЛЫ ТАКЖЕ ПОНЯТНО, ЧТО МОЛОЧНЫЙ КОКТЕЙЛЬ С ВЫСОКИМ КОЭФФИЦИЕНТОМ ВЯЗКОСТИ БЫСТРО НЕ ВЫПЬЕШЬ.

ОДНАКО, К СОЖАЛЕНИЮ,...

...ЭТО СООТНОШЕНИЕ ДЛЯ РАСХОДА ТЕКУЧЕЙ СРЕДЫ ПРИ ВТЯГИВАНИИ МОЛОЧНОГО КОКТЕЙЛЯ ВЫПОЛНЯЕТСЯ ТОЛЬКО ДЛЯ СЛУЧАЯ ЛАМИНАРНОГО ТЕЧЕНИЯ.

В СЛУЧАЕ ЖЕ ТУРБУЛЕНТНОГО ТЕЧЕНИЯ ВСЁ БУДЕТ СЛОЖНЕЕ. ?

Можно ли выпить молочный коктейль без проблем? (Расширенное уравнение Бернулли)

ИТАК, ДО ЭТОГО МОМЕНТА
МЫ РАССМОТРЕЛИ
"СКОРОСТЬ ТЕКУЧЕЙ СРЕДЫ"
И "РАСХОД ТЕКУЧЕЙ СРЕДЫ".

Энергия

ТРЕТИЙ,
И ПОСЛЕДНИЙ
ВОПРОС - ЭТО
"ЭНЕРГИЯ".

ТЕЧЕНИЕ ВЯЗКОЙ ТЕКУЧЕЙ СРЕДЫ
ДОЛЖНО ПРЕОДОЛЕВАТЬ ВЯЗ-
КОСТНОЕ НАПРЯЖЕНИЕ, ПОЭТОМУ
ЭНЕРГИЯ E ТЕКУЧЕЙ СРЕДЫ ТЕР-
ЯЕТСЯ ПО МЕРЕ ПРИБЛИЖЕНИЯ
К СТОРОНЕ НИЖНЕГО
ТЕЧЕНИЯ.

ТАК КАК СРЕДНЯЯ СКОРОСТЬ
ТЕКУЧЕЙ СРЕДЫ U В ЛЮБОМ
ПОПЕРЕЧНОМ СЕЧЕНИИ ТРУБЫ
ОДИНАКОВА, КИНЕТИЧЕСКАЯ
ЭНЕРГИЯ ПОСТОЯННА.

ОДНАКО, ЭНЕРГИЯ E ТЕКУЧЕЙ
СРЕДЫ ТЕРЯЕТСЯ. МОЖЕТ БЫТЬ,
ЭТИ ПОТЕРИ ЭНЕРГИИ ВОЗНИКАЮТ
ИЗ-ЗА ВЯЗКОСТНОГО
НАПРЯЖЕНИЯ?

ДА,
ПРАВИЛЬНО!

ТАКИЕ ПОТЕРИ ЭНЕРГИИ E
ИЗ-ЗА ВЯЗКОСТНОГО
НАПРЯЖЕНИЯ НАЗЫВАЮТСЯ
"ПОТЕРЯМИ НА ТРЕНИЕ".



Сила тяжести не учитывается

ОГО! ДА ОНА
ДОВОЛЬНО СИЛЬНО
СРЕЗАЕТСЯ!

МАА. ПОДОЖДИ, ЗНАЧИТ,
ДАЖЕ ЕСЛИ Я БУДУ
ВТЯГИВАТЬ КОКТЕЙЛЬ
ИЗО ВСЕХ СИЛ,...

...ЭТИ ПОТЕРИ НА ТРЕНИЕ
СТАНУТ ОЧЕНЬ ВЕЛИКИ?

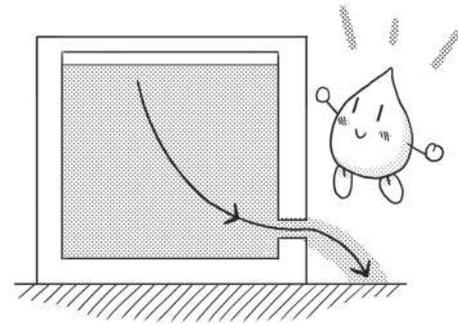
ДА, ТОГДА ВЫПИТЬ
МОЛОЧНЫЙ КОКТЕЙЛЬ ТЕБЕ
НИКОГДА НЕ УДАЕТСЯ.

Хлесть

Зачем ты так надо мной
прикалываешься?



ТЕПЕРЬ ДАВАЙТЕ
ПОРАЗМЫСЛЯЕМ, КАК
МНОГО ЭНЕРГИИ БУДЕТ
ПОТЕРЯНО В ПРОЦЕССЕ
ТЕЧЕНИЯ.

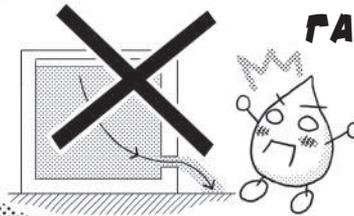


(См. стр.72)

ПОМНИТЕ, ЧТО ДЛЯ
ИДЕАЛЬНОЙ ТЕКУЧЕЙ
СРЕДЫ, У КОТОРОЙ НЕТ
ВЯЗКОСТИ....

...ВЫПОЛНЯЛАСЬ
ТЕОРЕМА БЕРНУЛЛИ,
И ЭНЕРГИЯ ТЕКУЧЕЙ СРЕДЫ
БЫЛА ПОСТОЯННА ВДОЛЬ
ЛИНИИ ТОКА?

ОДНАКО,
В СЛУЧАЕ ВЯЗКОЙ
ТЕКУЧЕЙ СРЕДЫ ЭНЕРГИЯ
БУДЕТ ТЕРЯТЬСЯ, ЭНЕРГИЯ E ,
ВЫРАЖАЕМАЯ УРАВНЕНИЕМ
БЕРНУЛЛИ, УМЕНЬШАЕТСЯ
С ПРИБЛИЖЕНИЕМ К НИЖНЕМУ
ТЕЧЕНИЮ!



ГАН!

ПРИ ЭТОМ
УРАВНЕНИЕ БЕРНУЛЛИ
ДЛЯ КАКОГО-ЛИБО
ПОПЕРЕЧНОГО
СЕЧЕНИЯ ТРУБЫ
МОЖНО ЗАПИСАТЬ
В СЛЕДУЮЩЕМ ВИДЕ.

ЭТО НАЗЫВАЕТСЯ
"РАСШИРЕННОЕ УРАВНЕНИЕ
БЕРНУЛЛИ"!

БОМ

$$\frac{1}{2} \rho u^2 + p + \rho g z = E(s) \text{ [Па]}$$

В ОТЛИЧИЕ ОТ ИДЕАЛЬНОЙ
ТЕКУЧЕЙ СРЕДЫ, ДЛЯ ВЯЗКОЙ
ТЕКУЧЕЙ СРЕДЫ ЭНЕРГИЯ E
В ПРАВОЙ ЧАСТИ НЕ ЯВЛЯЕТСЯ
КОНСТАНТОЙ, ИЗМЕНЯЯСЬ
ВДОЛЬ ЛИНИИ ТОКА s .

ЗАПИСЬ $E(s)$ ОЗНАЧАЕТ,
ЧТО E ЯВЛЯЕТСЯ
ФУНКЦИЕЙ s .

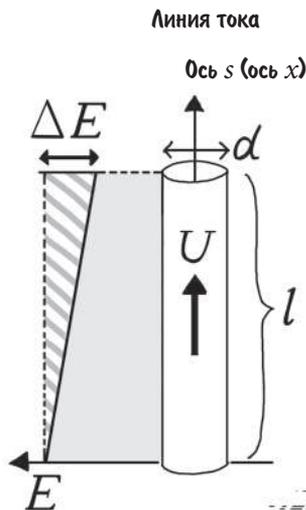
$E(s)$

УГУ... В САМОМ ДЕЛЕ,
ВЕЛИЧИНА ЭНЕРГИИ
В НИЖНЕМ ТЕЧЕНИИ (ВВЕРХУ
СОЛОМИНКИ) И В ВЕРХНЕМ
ТЕЧЕНИИ (ВНИЗУ СОЛОМИНКИ)
БУДЕТ ОТЛИЧАТЬСЯ.

УРА!
АПГРЕЙД!



НУ ЧТО, ЭКИ-САН,
ПОНЯЛА?



ЭТОТ РИСУНОК
ПОКАЗЫВАЕТ, ЧТО МЕЖДУ
ПОПЕРЕЧНЫМИ СЕЧЕНИЯМИ,
ОТДАЛЁННЫМИ ДРУГ ОТ
ДРУГА НА ДЛИНУ l , ПОТЕРИ
ЭНЕРГИИ ОКАЗАЛИСЬ
РАВНЫМИ ΔE .



ДАЛЕЕ, ЭТИ ПОТЕРИ
НА ТРЕНЬЕ В ТРУБЕ ΔE
ОТЛИЧАЮТСЯ ТЕМ, ЧТО ОНИ:

пропорциональны
длине трубы l :

пропорциональны квадрату
средней скорости текучей
среды U :

обратно пропорциональны
диаметру трубы d .

НУ КАК, ЭКИ-
САН?

МММ...



ЗНАЧИТ, ЕСЛИ ВТЯГИВАТЬ
О-О-ОЧЕНЬ БЫСТРО ЧЕРЕЗ
О-О-ОЧЕНЬ ТОНКУЮ И О-О-ОЧЕНЬ
ДЛИННУЮ СОЛОМКУ, ТО ПОТЕРИ
НА ТРЕНЬЕ В ТРУБЕ ΔE ОКАЖУТСЯ
ООЧЕНЬ ВЕЛИКИ, И МОЛОЧНЫЙ
КОКТЕЙЛЬ ВЫПИТЬ НЕ УДАТСЯ.

ЧТО-ТО
В ЭТОМ ДУХЕ?!



ТА-ДАМ!

ДА,
ПРАВИЛЬНО.

ТЕПЕРЬ ПОПРОБУЕМ
ВЫРАЗИТЬ СВЯЗЬ МЕЖДУ
ПОТЕРЯМИ НА ТРЕНЬЕ В ТРУБЕ ΔE ,
ДЛИНОЙ СОЛОМКИ l И ДИАМЕТРОМ
СОЛОМКИ d С ПОМОЩЬЮ ВЕЛИЧИНЫ,
НАЗЫВАЕМОЙ КОЭФФИЦИЕНТОМ ТРЕНЬЯ
В ТРУБЕ λ (ЛЯМБДА).

КОЭФФИЦИЕНТ ТРЕНЬЯ λ - ЭТО ЧТО-ТО
ТИПА КОЭФФИЦИЕНТА ПРОПОРЦИОНАЛЬ-
НОСТИ, И ДЛЯ ЛАМИНАРНОГО
ТЕЧЕНИЯ ОН ВЫРАЖАЕТСЯ ТАК:

$$\lambda = 64/Re.$$

СКРЪБ, СКРЪБ, СКРЪБ, СКРЪБ

ИТАК, ДАВАЙТЕ
В ЗАВЕРШЕНИЕ
ОБЪЕДИНИМ ВЫШЕПЕРЕ-
ЧИСЛЕННЫЕ СВОЙСТВА
И КОЭФФИЦИЕНТ λ .
В РЕЗУЛЬТАТЕ
МЫ ПОЛУЧИМ...



...«ФОРМУЛУ ДАРСИ-ВЕЙСБАХА»,
ВЫРАЖАЮЩУЮ ПОТЕРИ НА ТРЕНИЕ В ТРУБЕ:

ГОТОВО!

$$\Delta E = \lambda \frac{l}{d} \frac{1}{2} \rho U^2 \text{ [Па]}$$

ЗНАЧИТ, ЕСЛИ НЕ ПОДАТЬ ЭНЕРГИЮ,
ПРЕВЫШАЮЩУЮ ПОТЕРИ НА ТРЕНИЕ
В ТРУБЕ, ТО ТЕКУЧАЯ СРЕДА НЕ БУДЕТ
АВИГАТЬСЯ.

А В НАШЕМ СЛУЧАЕ ПОДАЧА ЭНЕРГИИ
ПРОИЗВОДИТСЯ ВО РТУ ЭКИ-САН.

ОГО! ЗНАЧИТ, МОЖНО УЗНАТЬ, КАКОВЫ
БЫЛИ ПОТЕРИ НА ТРЕНИЕ В ТРУБЕ, КОГДА
Я ПИЛА МОЛОЧНЫЙ КОКТЕЙЛЬ
ИЗ СОЛОМКИ?!?

ЭТА ФОРМУЛА ВЫРАЖАЕТ ЭНЕРГИЮ ЕДИНИЧНОГО
ОБЪЁМА, ТЕРЯЕМУЮ ИЗ-ЗА ВЯЗКОСТИ (ТРЕНИЯ) ПРИ
ПРОХОЖДЕНИИ ДЛИНЫ l СО СРЕДНЕЙ СКОРОСТЬЮ
ТЕКУЧЕЙ СРЕДЫ U ВНУТРИ ТРУБЫ ДИАМЕТРОМ d^*

ЭТО ПОМОЖЕТ МНЕ ОДОЛЕТЬ
МОЛОЧНЫЙ КОКТЕЙЛЬ!
НИ ЗА ЧТО НЕ ПРОИГРАЮ ЭТИМ
ПОТЕРЯМ НА ТРЕНИЕ!

* ϕ единице измерения Па см. на стр. 75

НЕУЖЕЛИ?



СЕГОДНЯ МЫ
ПОСТАРАЛИСЬ
НА СЛАВУ.

КАК ХОРОШО, КОГДА
УЧЁБА ДОСТАВЛЯЕТ
УДОВОЛЬСТВИЕ!



В СЛЕДУЮЩИЙ РАЗ
Я СОБИРАЮСЬ
ЗАКОНЧИТЬ
ИЗУЧЕНИЕ ОСНОВ.

ХОРОШО, ХОРОШО!
ДАВАЙТЕ
ПОСТАРАЕМСЯ!



Ух



СТАРОСТА,
В ЧЁМ ДЕЛО?

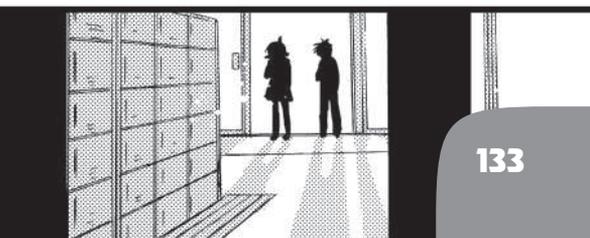
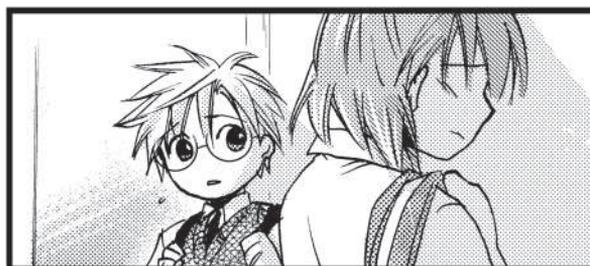
АКАНЭ-САН,
ЧЕГО ТЫ УЛЫ-
БЕШЬСЯ?

ДА ТАК.



ТЕПЕРЬ, КОГДА
Я СОБИРАЮСЬ
СКЛАДЫВАТЬ
ПОЛНОМОЧИЯ,...

...НАША ЭКИ НАКОНЕЦ-ТО СТАЛА
ПОХОЖА НА НАСТОЯЩЕГО ЧЛЕНА
ФИЗИЧЕСКОГО КРУЖКА.

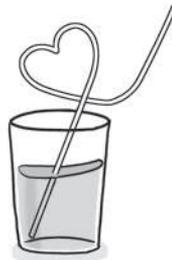




Потери давления в изогнутой трубе



В форме, например,
скрипичного ключа,
или сердечка...



Трубы не всегда бывают прямые: например, существуют изогнутые соломинки. Вблизи входа трубы, или в изогнутой части, или же там, где площадь поперечного сечения резко увеличивается или уменьшается, возникают потери энергии текучей среды, называемые «потерями давления». Такие потери давления ΔP , отличные от потерь на трение в трубе, выражаются формулой:

$$\Delta P = \zeta \frac{\rho U^2}{2}$$

Здесь ρ – это плотность текучей среды, а U – средняя скорость внутри трубы.

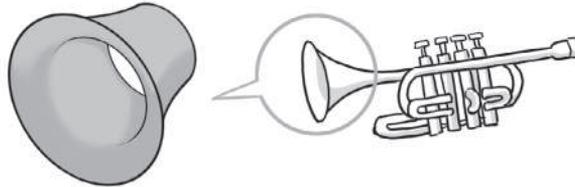
Буква ζ (дзета), которая называется «коэффициентом потерь», является константой и связана с формой трубы.

Коэффициент потерь выражает долю потерь кинетической энергии текучей среды $\rho U^2/2$.

Итак, далее я расскажу про конкретные значения коэффициента потерь ζ для труб различной формы.

♦ ПОТЕРИ НА ВХОДЕ

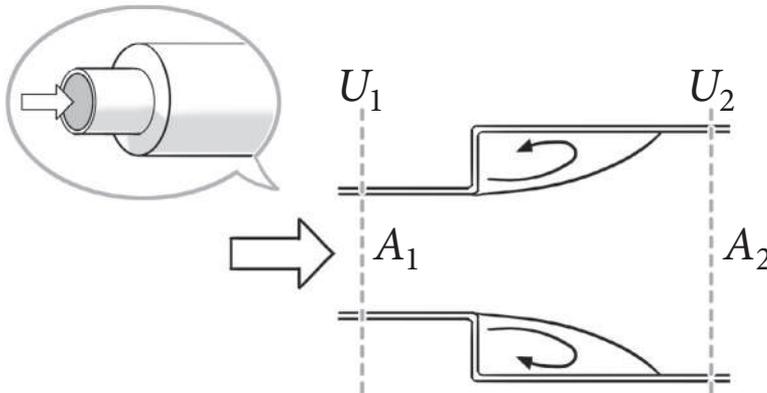
При вводе текучей среды из широкого пространства текучая среда вокруг входа трубы должна будет изменить направление течения в сторону трубы, поэтому на входе возникнут потери энергии. Потери на входе сильно зависят от формы входа.



Колоколообразный раструб, как у горна, позволяет уменьшить потери на входе. Его коэффициент потерь ζ составляет всего 0,006.

♦ РЕЗКО РАСШИРЯЮЩАЯСЯ ТРУБА

В резко расширяющейся трубе из-за скачкообразного увеличения площади поперечного сечения происходит резкое расширение течения, поэтому на участке резкого расширения возникают вихри, приводящие к большим потерям.

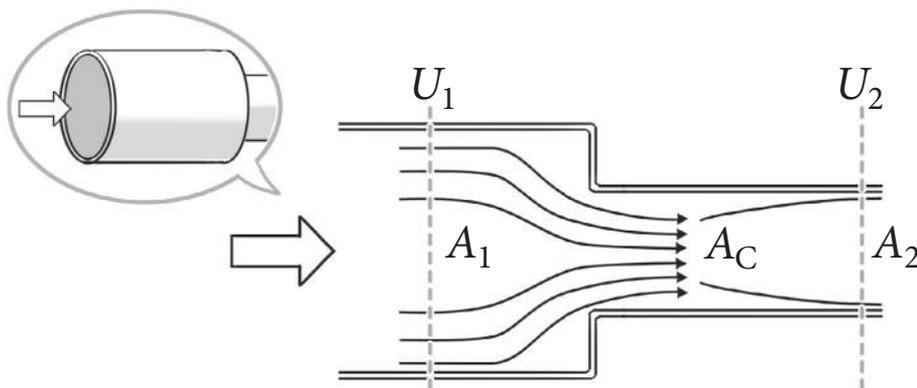


Если принять площадь поперечного сечения на входе за A_1 , площадь поперечного сечения расширяющейся части – за A_2 , а скорость на достаточном удалении от расширяющейся части – за U_2 , то коэффициент потерь ζ , вызванных изменением площади поперечного сечения, будет выражаться формулой:

$$\zeta = (1 - A_1 / A_2)^2$$

♦ РЕЗКО СУЖАЮЩАЯСЯ ТРУБА

В трубе со скачкообразным уменьшением площади поперечного сечения течение резко сужается, в результате чего площадь поперечного сечения течения A_c сразу после резкого сужения становится даже меньше, чем площадь поперечного сечения нижнего течения A_2



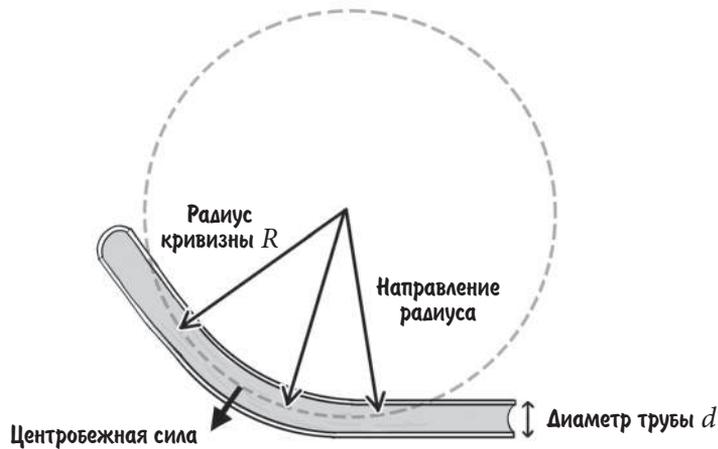
Если принять площадь поперечного сечения течения на участке сужения за A_c и ввести коэффициент сужения течения $C_c = A_c / A_2$, то коэффициент потерь ζ , вызванных резким сужением трубы, можно будет выразить формулой:

$$\zeta = (1/C_c - 1)^2$$

В случае резко сужающейся трубы за характерную скорость обычно принимают среднюю скорость в нижнем течении U_2 .

♦ ИЗОГНУТАЯ ТРУБА

Изогнутые трубы в зависимости от их кривизны делят на гнутые трубы и коленчатые трубы. Трубы с большим радиусом кривизны называют гнутыми трубами. Течение внутри изогнутой трубы отжимается в направлении радиус-вектора, что приводит к возникновению вихрей.



Если принять диаметр трубы за d , угол изгиба за θ [°], а радиус кривизны за R , то коэффициент потерь ζ в гнутой трубе можно будет выразить формулой:

$$\zeta = \left\{ 0,131 + 1,847 \left(\frac{d}{2R} \right)^{3,5} \right\} \frac{\theta}{90} \quad (0,5 < R/r < 2,5)$$

Вода, оставшаяся в ванне, и нефть Аравийского моря?!

На этом занятии мы использовали в качестве примера явления из повседневной жизни. Так, в качестве примеров использовались, например, молочный коктейль, соломинка, рот Эки-сан.

Если заменить это промышленным примером, то молочный коктейль превратится в нефть, соломинка – в нефтепровод, а рот – в насос.

Итак, здесь у меня к вам есть один вопрос.

Насос, который перекачивает из стиральной машины воду, оставшуюся после стирки, невозможно использовать для того, чтобы качать нефть Аравийского моря. Как вы думаете, почему?

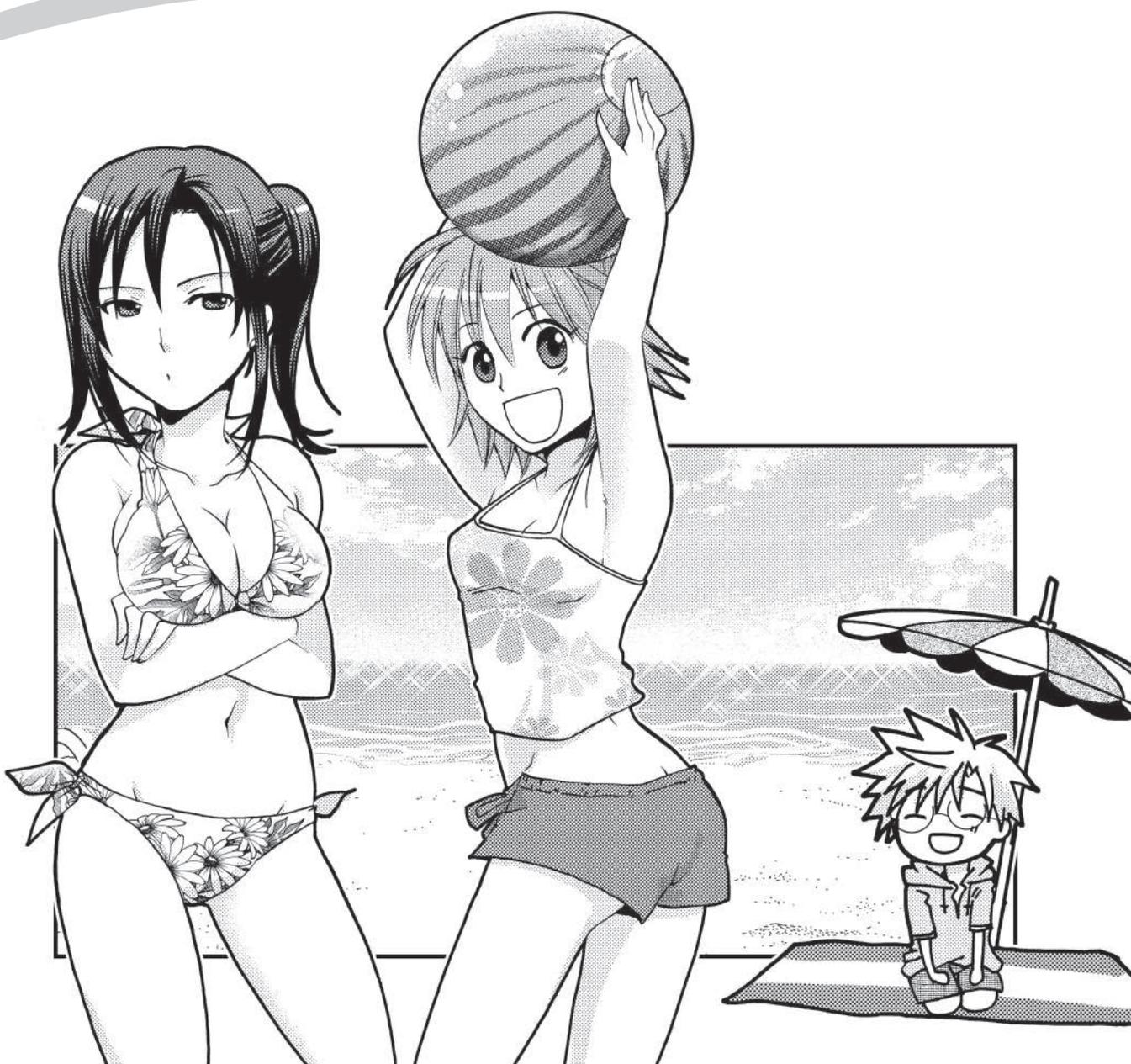
Сейчас, когда мы изучили вязкость, вам, несомненно, будет очень легко ответить на этот вопрос. У нефти высокий коэффициент вязкости, и, согласно закону вязкости Ньютона, будет большое вязкостное сопротивление. В результате увеличится трение в трубе, поэтому нефть невозможно качать с помощью насоса от стиральной машины.

Таким образом, реально используемые насосы и другие промышленные изделия проектируются с учётом коэффициента вязкости текучих сред, для которых они предназначены.

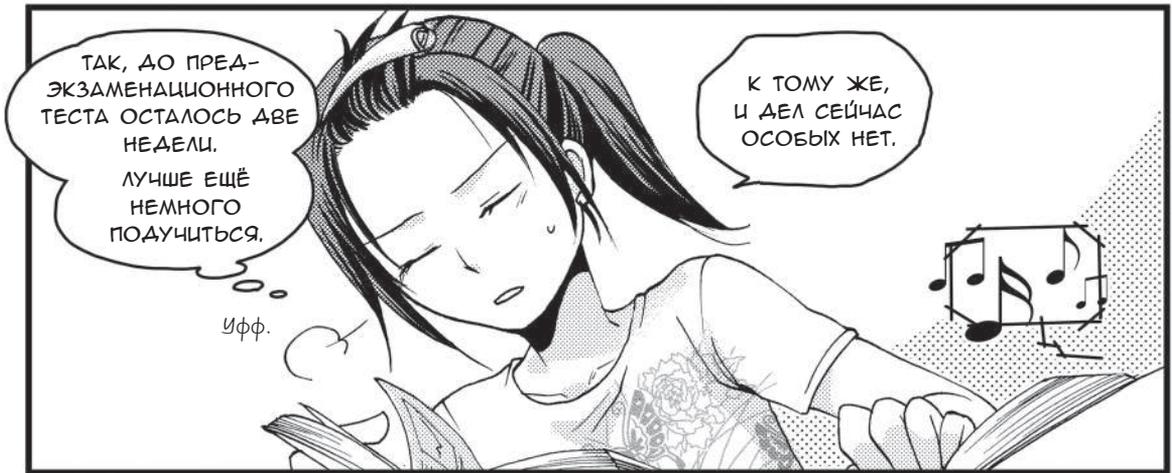


Глава 4

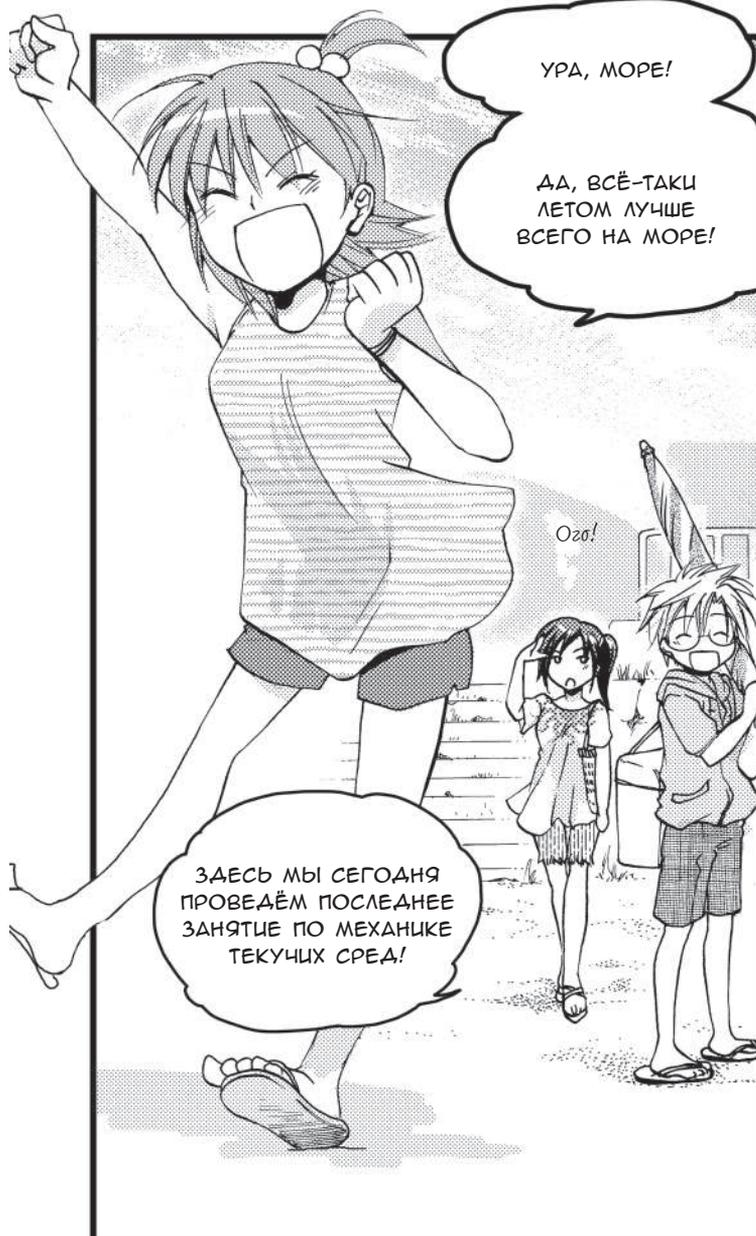
ЛОБОВОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ И ПОДЪЁМНАЯ СИЛА



1. ЛОБОВОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ И ПОДЪЁМНАЯ СИЛА, ДЕЙСТВУЮЩИЕ НА ТЕЛО



ПЛЕСК!



УРА, МОРЕ!

АА, ВСЁ-ТАКИ
ЛЕТОМ ЛУЧШЕ
ВСЕГО НА МОРЕ!

Ого!

ЗДЕСЬ МЫ СЕГОДНЯ
ПРОВЕДЁМ ПОСЛЕДНЕЕ
ЗАНЯТИЕ ПО МЕХАНИКЕ
ТЕКУЩИХ СРЕД!



СТАРОСТА, ИЗВИНИ,
ТЫ СЕЙЧАС
ЗАНЯТА?

Ура!

НЕ ОСОБО.



АА, ЛУЧШИЙ ОТ-
ДЫХ - ПЕРЕМЕНА
ОБСТАНОВКИ!

КАК ХОРОШО!

Эй, СИРАУСИ!
ЧЕМ МЫ ЗАЙМЁМСЯ
СЕГОДНЯ?

Плеск,
Плеск



МЫ, ТАК СКАЗАТЬ,
БУДЕМ СЕГОДНЯ
РАЗГАДЫВАТЬ ЗАГАДКИ
ТАИСТВЕННЫХ ЯВЛЕНИЙ
С ПОМОЩЬЮ МЕХАНИКИ
ТЕКУЩИХ СРЕД.

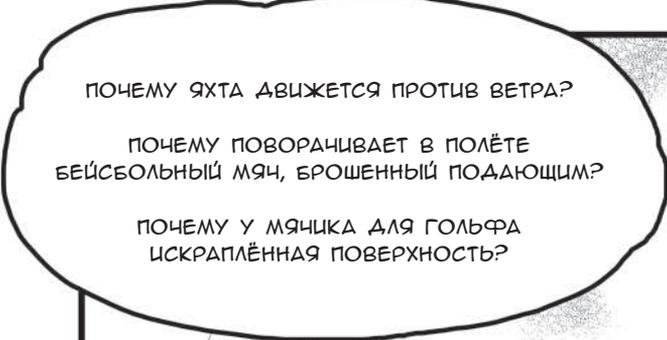


ТАИСТВЕННЫХ
ЯВЛЕНИЙ! ЧТО, ОПЯТЬ
ОККУЛЬТИЗМ?!

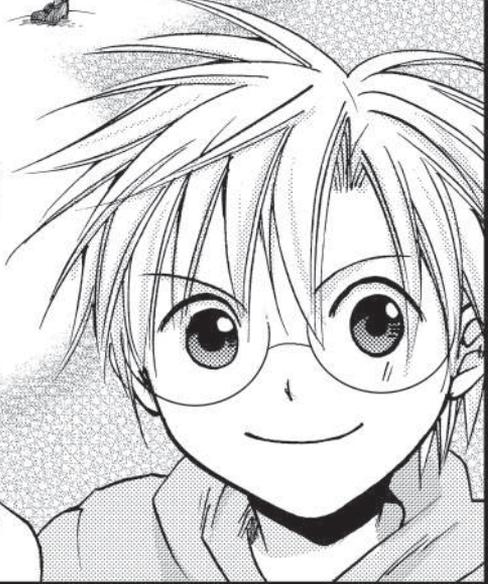


НАДЕЮСЬ,
ОБОЙДЁТСЯ
БЕЗ ПРИВИДАНИЙ?

ТУ-
ТУМ



ПОЧЕМУ ЯХТА ДВИЖЕТСЯ ПРОТИВ ВЕТРА?
ПОЧЕМУ ПОВОРАЧИВАЕТ В ПОЛЁТЕ
БЕЙСБОЛЬНЫЙ МЯЧ, БРОШЕННЫЙ ПОДАЮЩИМ?
ПОЧЕМУ У МЯЧИКА ДЛЯ ГОЛЬФА
ИСКРАПЛЁННАЯ ПОВЕРХНОСТЬ?



СЕЙЧАС Я РАССКАЖУ О ТОМ,
В ЧЁМ ЗАКЛЮЧАЕТСЯ ОТВЕТ
НА ВСЕ ЭТИ ЗАГАДКИ - ...

...О "СИЛАХ, ДЕЙСТВУЮЩИХ НА
ТЕЛО В РЕЗУЛЬТАТЕ ТЕЧЕНИЯ"!



ЭТО ТАКЖЕ ПОЗВОЛИТ
НАМ ПОНЯТЬ ПРИЧИНУ,
ПО КОТОРОЙ ПТИЦЫ ИЛИ
САМОЛЁТЫ МОГУТ ЛЕТАТЬ.

ОГО! ЭТО ЖЕ ЗАОРОВО!
РАССКАЗЫВАЙ СКОРЕЕ,
СИРАЦСИ!

Почему птицы и самолёты могут летать по небу? (Подъёмная сила)

ПОЧЕМУ ПТИЦЫ И САМОЛЁТЫ МОГУТ ЛЕТАТЬ?

ЧТОБЫ ВЫ ПОНЯЛИ ЭТО, ДЛЯ НАЧАЛА Я РАССКАЖУ О ЛОБОВОМ СОПРОТИВЛЕНИИ И ПОДЪЁМНОЙ СИЛЕ.

ЭТО, К ПРИМЕРУ, ВЕТЕР, КОТОРЫЙ ВЫ ЧУВСТВУЕТЕ, КОГДА ЕДЕТЕ НА ВЕЛОСИПЕДЕ,...

ОЧЕНЬ СИЛЬНО УПРОЩАЯ, МОЖНО СКАЗАТЬ, ЧТО ЛОБОВОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ - ЭТО ПРЕПЯТСТВУЮЩАЯ СИЛА, А ПОДЪЁМНАЯ СИЛА - ЭТО ТО, ЧТО ПОДНИМАЕТ ПТИЦУ ИЛИ САМОЛЁТ.

ПРЕПЯТСТВУЮЩАЯ СИЛА?

...ИЛИ ЗАТРУДНЁННОСТЬ ДВИЖЕНИЙ, КОТОРАЯ ОЩУЩАЕТСЯ В ВОДЕ.



ЗДЕСЬ ВАЖНО, ЧТО ДАЖЕ ЕСЛИ ВОЗДУХ ИЛИ ВОДА САМИ ПО СЕБЕ НЕ ДВИЖУТСЯ, НО ЕСЛИ ЧЕЛОВЕК ДВИЖЕТСЯ СПРАВА НАЛЕВО,...

...ТО ЭТО БУДЕТ АНАЛОГИЧНО ОТНОСИТЕЛЬНОМУ ТЕЧЕНИЮ СЛЕВА НАПРАВО В СИСТЕМЕ КООРДИНАТ, СВЯЗАННОЙ С ЧЕЛОВЕКОМ.

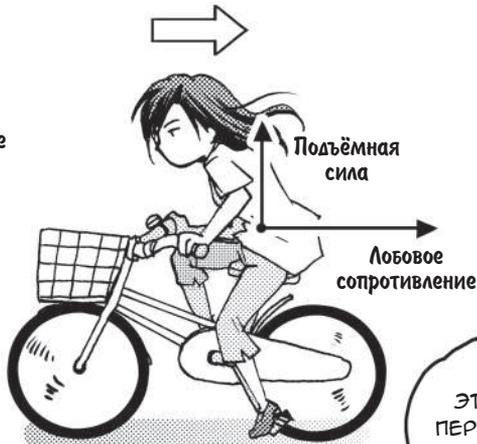


ДЕЙСТВИТЕЛЬНО, ЕСЛИ ДВИЖЕШЬСЯ, ТО ДАЖЕ В БЕЗВЕТРИЕ ЧУВСТВУЕШЬ ВЕТЕР.

В ОТЛИЧИЕ
ОТ ЛОБОВОГО
СОПРОТИВЛЕНИЯ,
ДЕЙСТВУЮЩЕГО ВДОЛЬ
НАПРАВЛЕНИЯ
ТЕЧЕНИЯ,...

Направление
движения
человека

Направление течения в системе координат,
связанной с человеком



...ПОДЪЁМНАЯ СИЛА -
ЭТО СИЛА, НАПРАВЛЕННАЯ
ПЕРПЕНДИКУЛЯРНО ТЕЧЕНИЮ
(В ДАННОМ СЛУЧАЕ,
ВЕРТИКАЛЬНО ВВЕРХ).

ПОДЪЁМНАЯ СИЛА
ОЧЕНЬ ЗАВИСИТ
ОТ ФОРМЫ ТЕЛА.



ТАК, ФОРМА КРЫЛА
САМОЛЁТА ПОЗВОЛЯЕТ
СОЗДАВАТЬ БОЛЬШУЮ
ПОДЪЁМНУЮ СИЛУ,...

...НО, К СОЖАЛЕНИЮ,
ПОДЪЁМНАЯ СИЛА,
ДЕЙСТВУЮЩАЯ НА
ВЕЛОСИПЕДА ИЛИ ЧЕЛОВЕКА
В ВОДЕ, ОЧЕНЬ МАЛА.

НАВЕРНОЕ, ПОЭТОМУ
НЕТ ВЕЛОСИПЕДИСТОВ,
ЛЕТЯЩИХ ПО НЕБУ?



А жаль!



АГА!

ПОДЪЁМНАЯ СИЛА,
НАПРАВЛЕННАЯ
ВВЕРХ.



В РАССКАЗЕ ПРО СИЛУ
ПЛАВУЧЕСТИ ТЫ УЖЕ
ОБЪЯСНЯЛ ЕЁ, ДА?*

ИТАК, ДАВАЙТЕ ЗДЕСЬ
ПРОЯСНИМ РАЗНИЦУ
МЕЖДУ "ПОДЪЁМНОЙ
СИЛОЙ" И "СИЛОЙ
ПЛАВУЧЕСТИ"!

УПРОЩЁННО МОЖНО СКА-
ЗАТЬ, ЧТО СИЛА ПЛАВУЧЕ-
СТИ - ЭТО СИЛА, КОТОРАЯ
ДЕЙСТВУЕТ ДАЖЕ НА
ПОКОЯЩЕЕСЯ ТЕЛО.

В ТО ВРЕМЯ, КАК
ПОДЪЁМНАЯ СИЛА -
ЭТО СИЛА, ВОЗНИКАЮЩАЯ
ПРИ НАЛИЧИИ РАЗНОСТИ
СКОРОСТЕЙ ТЕЛА
И ТЕКУЧЕЙ СРЕДЫ.

Сила
плавучести



Ага!

Подъёмная
сила



ВОТ ОНО ЧТО!

*См. на стр. 43

ДЕЙСТВИТЕЛЬНО, КОРАБЛЬ ДЕРЖИТСЯ НА ВОДЕ, ДАЖЕ КОГДА ОН СТОИТ НА МЕСТЕ!

Сила плавучести

ШЛЁП, ШЛЁП

Сила тяжести

ВОТ ИМЕННО!

И ПТИЦЫ, И САМОЛЁТЫ СПОСОБНЫ ЛЕТАТЬ БЛАГОДАРИ ЭТОЙ ПОДЪЁМНОЙ СИЛЕ.

Направление течения в системе координат, связанной с птицей

Подъёмная сила

Направление полёта птицы

Лобовое сопротивление

Направление течения в системе координат, связанной с самолётом

Подъёмная сила

Направление полёта самолёта

Лобовое сопротивление

СКОРОСТЬ ТАКИХ ТЕЛ, КАК ПТИЦА ИЛИ САМОЛЁТ, БОЛЬШЕ, ЧЕМ СКОРОСТЬ ОКРУЖАЮЩЕЙ ИХ ТЕКУЩЕЙ СРЕДЫ (ВОЗДУХА), И ПОЭТОМУ ВОЗНИКАЕТ ПОДЪЁМНАЯ СИЛА.

ОГО!

ТЕПЕРЬ ВСЁ ВСТАЛО НА СВОИ МЕСТА! ПОДЪЁМНАЯ СИЛА - ЭТО ТАК ПРОСТО!

ЭКИ, ПОДУМАЙ КАК СЛЕДУЕТ. ВЕДЬ ЧТОБЫ ПОНЯТЬ ДЕТАЛЬНЫЕ ПРИЧИНЫ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ПОДЪЁМНОЙ СИЛЫ, НУЖНА МЕХАНИКА ТЕКУЩИХ СРЕД.

ТЫ ПРАВА, СТАРОСТА!

ИТАК, ТЕПЕРЬ ДАВАЙТЕ ИЗУЧИМ ИСТИННУЮ ПРИРОДУ ЭТОЙ ПОДЪЁМНОЙ СИЛЫ!

Подъёмная сила

ИСТИННУЮ ПРИРОДУ?! ЭТО ЗВУЧИТ ТАК ИНТРИГУЮЩЕ!

💧 Почему яхта движется против ветра? (Использование подъёмной силы)



ДАВАЙТЕ ПОРАЗМЫШЛЯЕМ НАД ТАКОЙ ЗАГАДКОЙ: "ПОЧЕМУ ЯХТА ДВИЖЕТСЯ ПРОТИВ ВЕТРА?" ЭТО ТАКЖЕ ПОМОЖЕТ НАМ ГЛУБЖЕ ПОНЯТЬ СИЛУ ТЯЖЕСТИ.



ДА, СЕЙЧАС КАК РАЗ ВОН ТА ЯХТА ПЛЫВЁТ ПРОТИВ ВЕТРА.



ИСПОЛЬЗУЮЩАЯ ВЕТЕР ЯХТА ПЛЫВЁТ ПРОТИВ НЕГО!
ПОИСТИНЕ, В ЭТОМ ЕСТЬ КАКАЯ-ТО МИСТИКА!



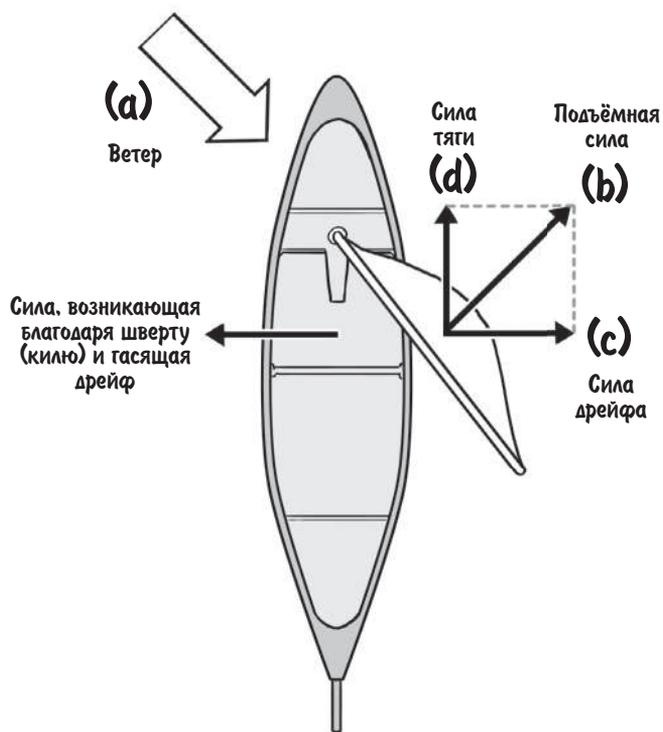
УДИВИТЕЛЬНО, НЕ ТАК ЛИ?
НАЧНУ С РАЗГАДКИ. НА САМОМ ДЕЛЕ, ЯХТА ТОЖЕ ИСПОЛЬЗУЕТ ПОДЪЁМНУЮ СИЛУ!



ДА НЕУЖЕЛИ?! ЗНАЧИТ, ПОДЪЁМНАЯ СИЛА ИМЕЕТ ОТНОШЕНИЕ НЕ ТОЛЬКО К САМОЛЁТАМ И ПТИЦАМ.



ПАРУС ЯХТЫ СИЛЬНО ИСКРИВЛЁН, НЕ ТАК ЛИ? ПРИ РАСТЯЖЕНИИ ОН ПРИОБРЕТАЕТ КРИВИЗНУ И СТАНОВИТСЯ ПОДОБЕН КРЫЛУ САМОЛЁТА. В РЕЗУЛЬТАТЕ ЭТОГО НА ПАРУС НАЧИНАЕТ ДЕЙСТВОВАТЬ ПОДЪЁМНАЯ СИЛА.



Вид яхты сверху

Источник: Aquamuse 141, Принципы яхт - Сила тяги
<http://www.aquamuse.jp/zukai/suishin/index.html>, с частичными исправлениями



ВЗГЛЯНИТЕ НА РИСУНОК. КОГДА С НАПРАВЛЕНИЯ (a) ДУЕТ ВЕТЕР, ТОГДА В НАПРАВЛЕНИИ (b), КОТОРОЕ ПЕРПЕНДИКУЛЯРНО (a), ВОЗНИКАЕТ ПОДЪЁМНАЯ СИЛА.



А, ПОНЯТНО! ЕСЛИ ПОСМОТРЕТЬ НА ЯХТУ СВЕРХУ, ТО СРАЗУ СТАНЕТ ЯСНО, ЧТО ЭТО ПЕРПЕНДИКУЛЯРНОЕ НАПРАВЛЕНИЕ.



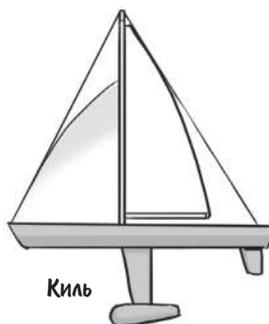
ЭТУ ПОДЪЁМНУЮ СИЛУ В НАПРАВЛЕНИИ (b) МОЖНО РАЗЛОЖИТЬ НА СИЛУ ТЯГИ В НАПРАВЛЕНИИ (d), В КОТОРОМ СТРЕМИТСЯ ДВИГАТЬСЯ ЯХТА, И СИЛУ ДРЕЙФА В НАПРАВЛЕНИИ (c).



СИЛА ТЯГИ НАМ НУЖНА, НО СИЛА ДРЕЙФА - СОВСЕМ НЕ К ЧЕМУ! ВЕДЬ ОНА СНОСИТ ЯХТУ ВБОК.



ЭТА СИЛА ДРЕЙФА ГАСИТСЯ С ПОМОЩЬЮ ДОСКИ, КОТОРУЮ НАЗЫВАЮТ КИЛЕМ. КИЛЬ КРЕПИТСЯ В НИЖНЕЙ ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЧАСТИ КОРПУСА КОРАБЛЯ И ПОГРУЖЁН В ВОДУ.



С помощью этого килля стараются максимально погасить силу дрейфа в направлении (c) .



ЗНАЧИТ, ЯХТА ДВИЖЕТСЯ БЛАГОДАРЯ СИЛЕ ТЯГИ В НАПРАВЛЕНИИ (d) . ПОДЪЁМНАЯ СИЛА ДЕЙСТВИТЕЛЬНО МОЖЕТ БЕЗ ТРУДА ЗАСТАВИТЬ ЯХТУ ЦАПИ ПРОТИВ ВЕТРА! ВОТ МЫ И ОТГАДАЛИ ЗАГАДКУ "ПОЧЕМУ ЯХТА МОЖЕТ ДВИГАТЬСЯ ПРОТИВ ВЕТРА"! УРА!



ДА, Я ПОНЯЛА, ЧТО ЯХТА ДВИЖЕТСЯ БЛАГОДАРЯ УМЕЛОМУ ИСПОЛЬЗОВАНИЮ ПОДЪЁМНОЙ СИЛЫ. ОДНАКО ВОЗНИКНОВЕНИЕ ПОДЪЁМНОЙ СИЛЫ КАЖЕТСЯ МНЕ ЕЩЁ БОЛЕЕ ЗАГАДОЧНЫМ. ГОВОРИШЬ, ОНА ВОЗНИКАЕТ ИЗ-ЗА КРИВИЗНЫ ПАРУСА? В ЧЁМ ЖЕ ТУТ ДЕЛО?



НУ ХВАТИТ, АКАНЭ! ТЫ СЛИШКОМ ПОДОЗРИТЕЛЬНА.



НЕТ, ЭТО ТЫ ЧЕРЕСЧУР ДОВЕРЧИВА.



НУ, ЛАДНО ВАМ. ДАВАЙТЕ ТЕПЕРЬ КАК СЛЕДУЕТ ПОДУМАЕМ НАД ПРИЧИНОЙ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ПОДЪЁМНОЙ СИЛЫ.

Что общего между крылом и парусом? (Теорема о кривизне линий тока)

Кривизна линий
тока

ПОЧЕМУ ВОЗНИКАЕТ ПОДЪЁМНАЯ СИЛА? НА ЭТОТ ВОПРОС НАМ ОТВЕТИТ "ТЕОРЕМА О КРИВИЗНЕ ЛИНИЙ ТОКА".

ЭТО ОЧЕНЬ ВАЖНАЯ ТЕОРЕМА, ОБЪЯСНЯЮЩАЯ, ПОЧЕМУ ВОЗНИКАЕТ ПОДЪЁМНАЯ СИЛА ПРИ ДВИЖЕНИИ ТЕКУЧЕЙ СРЕДЫ У ПОВЕРХНОСТИ ИЗОГНУТОЙ ДОСКИ, ТАКОЙ, КАК КРЫЛО.

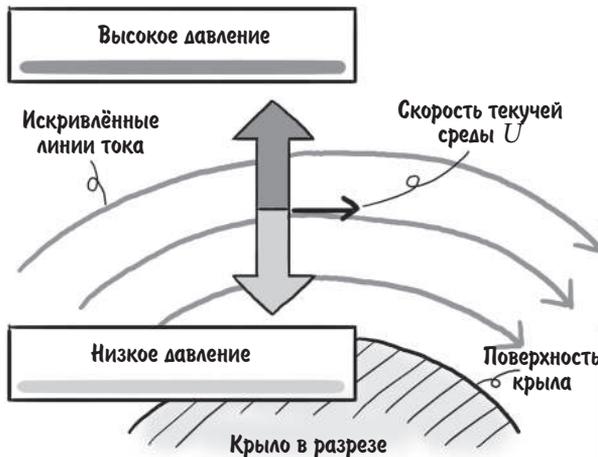
ОГО! ЗНАЧИТ, НАМ БЕЗ НЕЁ НЕ ОБОЙТИСЬ.



На рисунке ниже показано вертикальное поперечное сечение крыла самолёта



Увеличиваем!



Рисунок, показывающий искривлённые линии тока, обтекающие крыло

- ПО ПОВОДУ КРИВИЗНЫ ЛИНИЙ ТОКА НАДО УСВОИТЬ ТРИ МОМЕНТА:
- КОГДА ТЕКУЧАЯ СРЕДА ВСТРЕЧАЕТСЯ С ИЗОГНУТОЙ ДОСКОЙ, НАПРИМЕР, С КРЫЛОМ, ОНА ИСКРИВЛЯЕТСЯ ВДОЛЬ ПОВЕРХНОСТИ ЭТОЙ ДОСКИ.
 - ПРИ СМЕЩЕНИИ К ЦЕНТРУ КРИВИЗНЫ* ЛИНИЙ ТОКА (ПОВЕРХНОСТИ КРЫЛА) ДАВЛЕНИЕ БУДЕТ СНИЖАТЬСЯ, А ПРИ СМЕЩЕНИИ ОТ ЦЕНТРА КРИВИЗНЫ ЛИНИЙ ТОКА - УВЕЛИЧИВАТЬСЯ.
 - ЧЕМ БОЛЬШЕ СКОРОСТЬ ТЕКУЧЕЙ СРЕДЫ U И ЧЕМ МЕНЬШЕ РАДИУС КРИВИЗНЫ КРЫЛА r (ЧТО СООТВЕТСТВУЕТ БОЛЕЕ ИСКРИВЛЁННОМУ КРЫЛУ), ТЕМ БОЛЬШЕ ВЕЛИЧИНА ИЗМЕНЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ.

* Центр кривизны кривой линии – это центр окружности, содержащий эту кривую линию, а радиус этой окружности называют радиусом кривизны



НЕ, НЕ ВОЛНУЙТЕСЬ, СЕЙЧАС Я ОБЪЯСНЮ ВАМ ВСЁ ПО ПОРЯДКУ.

ФУУ



РАССМОТРИМ СНАЧАЛА ЛИНИИ ТОКА НАХОДЯЩИЕСЯ ВНУТРИ МАЛЕНЬКОГО ПРЯМОУГОЛЬНИКА!



* Скорость направлена по касательной к линиям тока. (см. на стр. 58)

ПРИМЕМ НАПРАВЛЕННЫЙ ВОВНЕ ПЕРПЕНДИКУЛЯР К ЛИНИЯМ ТОКА ЗА ПОЛОЖИТЕЛЬНО НАПРАВЛЕНИЕ ОСИ r, А МАЛОЕ РАССТОЯНИЕ ПО ЭТОЙ ОСИ - ЗА Δr .

ДАЛЕЕ, ЕСЛИ ПРИНЯТЬ ВЕЛИЧИНУ ИЗМЕНЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ ДЛЯ ЭТОГО Δr ЗА $\Delta p = p_2 - p_1$, А ПЛОТНОСТЬ ТЕКУЧЕЙ СРЕДЫ - ЗА ρ ,...

...ТО ТЕОРЕМУ О КРИВизНЕ ЛИНИЙ ТОКА МОЖНО БУДЕТ ВЫРАЗИТЬ ВОТ ТАКОЙ ФОРМУЛОЙ!

$\Delta p / \Delta r$, ВЫРАЖАЮЩЕЕ ВЕЛИЧИНУ ИЗМЕНЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ В НАПРАВЛЕНИИ РАДИУСА - ЭТО ЖЕ ГРАДИЕНТ ДАВЛЕНИЯ.

ТО ЕСТЬ, ЕСЛИ МЫ ПРОВАДНИМСЯ НА Δr [М], ТО ДАВЛЕНИЕ ИЗМЕНИТСЯ НА Δp [ПА], ДА?

Скорость текучей среды U
Радиус линий тока r

$$\frac{\Delta p}{\Delta r} = \rho \frac{U^2}{r}$$

ЗДЕСЬ НУЖНО УСВОИТЬ, ЧТО ДАВЛЕНИЕ ОЦЕНИВАЕТСЯ КАК "ВЫСОКОЕ" ИЛИ "НИЗКОЕ" ОТНОСИТЕЛЬНО АТМОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ.

Атмосферное давление

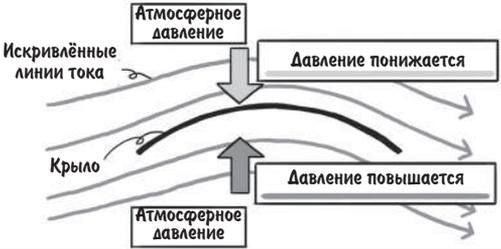
АНАЛОГИЧНЫЕ РАССУЖДЕНИЯ МОЖНО ПРОВОДИТЬ И ДЛЯ НИЖНЕЙ СТОРОНЫ КРЫЛА.

ТО ЕСТЬ ТЕОРЕМА О КРИВизНЕ ЛИНИЙ ТОКА ФОРМУЛИРУЕТСЯ ТАК.

КРЫЛО - ЭТО ИЗОГНУТАЯ ДОСКА, СОЗДАЮЩАЯ ИСКРИВЛЁННОЕ ТЕЧЕНИЕ!

Теорема о кривизне линий тока

- Когда на крыло набегает ветер:
- Для верхней поверхности крыла, при смещении к центру кривизны линий тока, давление становится ниже атмосферного.
 - Для нижней поверхности крыла, при смещении от центра кривизны линий тока, давление становится выше атмосферного.
 - Однако на значительном удалении вверх от крыла и значительном удалении вниз от крыла давления одинаковы и равны атмосферному давлению.



Давление на верхней поверхности меньше атмосферного. Давление на нижней поверхности больше атмосферного

Следовательно

Давление на верхней поверхности меньше давления на нижней поверхности

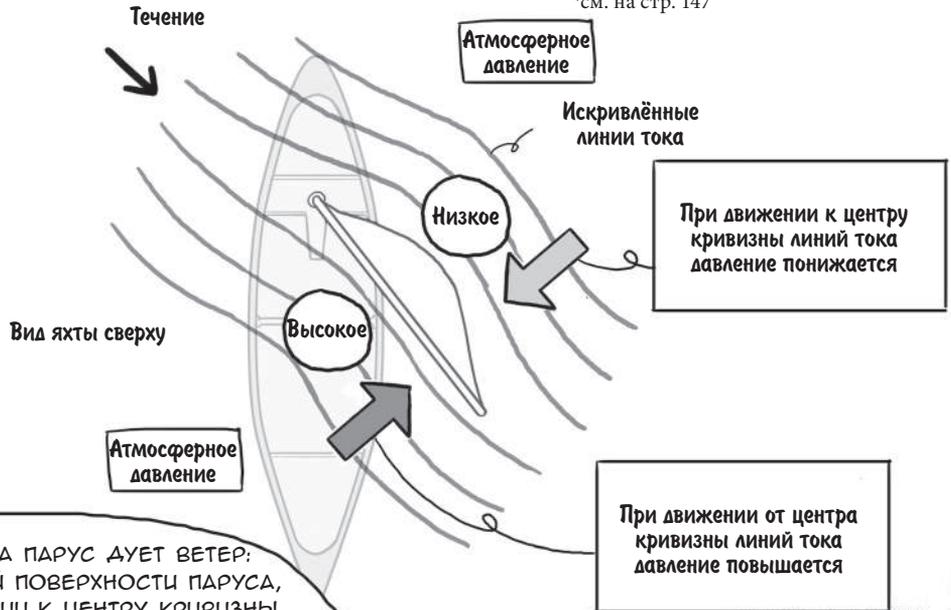


ТЕПЕРЬ ДАВАЙТЕ
ОБДУМАЕМ ДРУГОЙ
КОНКРЕТНЫЙ ПРИМЕР
ИЗОГНУТОЙ ДОСКИ:...



...СЛУЧАЙ С ЯХТОЙ,
О КОТОРОМ МЫ ТОЛЬКО
ЧТО ГОВОРИЛИ*.

*см. на стр. 147



КОГДА НА ПАРУС ДУЕТ ВЕТЕР:

- для верхней поверхности паруса, при движении к центру кривизны линий тока давление становится ниже атмосферного.
- для нижней поверхности паруса, при движении от центра кривизны линий тока давление становится выше атмосферного.
- однако на значительном удалении вверх от паруса и значительном удалении вниз от паруса давления одинаковы и равны атмосферному давлению.

ИТАК, АКАНЭ!
ПОПРОБУЙ
ПОДВЕСТИ
ИТОГИ!



ТАК, ДАВЛЕНИЕ НА
ВЕРХНЕЙ ПОВЕРХНОСТИ
МЕНЬШЕ АТМОСФЕРНОГО,
А ДАВЛЕНИЕ НА НИЖНЕЙ
ПОВЕРХНОСТИ БОЛЬШЕ
АТМОСФЕРНОГО.

СЛЕДОВАТЕЛЬНО, ДАВЛЕНИЕ
НА ВЕРХНЕЙ ПОВЕРХНОСТИ МЕНЬШЕ
ДАВЛЕНИЯ НА НИЖНЕЙ
ПОВЕРХНОСТИ, ТАК?

ого!



СОВЕРШЕННО ВЕРНО!

А ТЕПЕРЬ ПОПРОБУЙТЕ
ВСПОМНИТЬ. НА БАЗЕ ОТАБИХА
МЫ ПРОВОДИЛИ ОПЫТ,

В КОТОРОМ ДВЕ БАНКИ
ПРЯТЯГИВАЛИСЬ ДРУГ
К ДРУГУ, НЕ ТАК ЛИ?





А! -
 ТЫ ПРО ТОТ ОПЫТ С БАНКАМИ*!
 ДА, ТЫ ГОВОРИЛ ТОГДА, ЧТО ДВЕ БАНКИ СЕЛИЗИЛИСЬ ПОТОМУ, ЧТО ВОЗНИКЛА СИЛА, НАПРАВЛЕННАЯ ИЗ ОБЛАСТИ ПОВЫШЕННОГО ДАВЛЕНИЯ В ОБЛАСТЬ Пониженного!

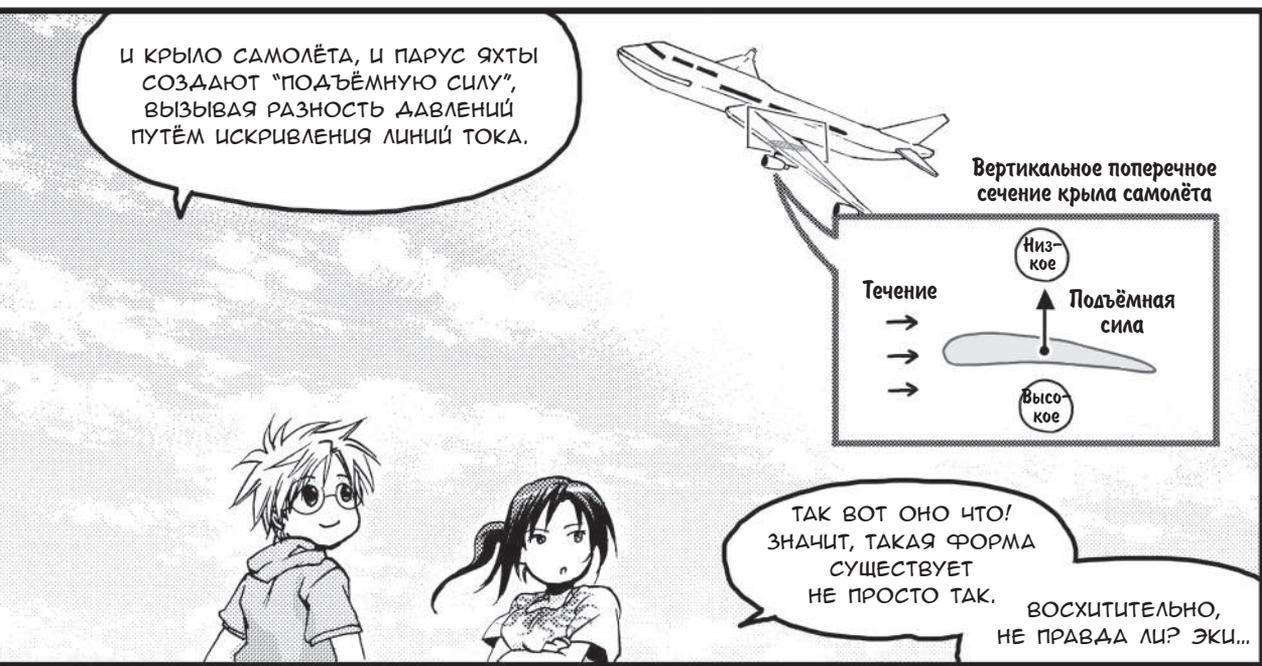
ДА.
 АГА!



ЗНАЧИТ, ЭТА ПОДЪЁМНАЯ СИЛА ТОЖЕ ВОЗНИКАЕТ ИЗ-ЗА РАЗНОСТИ ДАВЛЕНИЙ, ТАК КАК ДАВЛЕНИЕ НА ВЕРХНЕЙ ПОВЕРХНОСТИ МЕНЬШЕ, ЧЕМ НА НИЖНЕЙ?

Вид на парус сверху
 Течение
 Высокое
 Низкое
 Подъёмная сила
 ВЕРНО!

* см. на стр. 79



И КРЫЛО САМОЛЁТА, И ПАРУС ЯХТЫ СОЗДАЮТ "ПОДЪЁМНУЮ СИЛУ", ВЫЗЫВАЯ РАЗНОСТЬ ДАВЛЕНИЙ ПУТЁМ ИСКРИВЛЕНИЯ ЛИНИЙ ТОКА.

Вертикальное поперечное сечение крыла самолёта
 Течение
 Высокое
 Низкое
 Подъёмная сила

ТАК ВОТ ОНО ЧТО! ЗНАЧИТ, ТАКАЯ ФОРМА СУЩЕСТВУЕТ НЕ ПРОСТО ТАК. ВОСХИТИТЕЛЬНО, НЕ ПРАВДА ЛИ? ЭКИ...



Ой!
 А где же ЭКИ?
 Эй, АКАНЭ!
 СИРАИСИ!



В ЭТОМ РЕСТОРАНЕ ЕСТЬ КРОШЕНЫЙ ЛЁД! И СОУС КАРРИ! И ЖАРЕНАЯ ЛАПША "ЯКИСОБА"! КАКОЙ АППЕТИТНЫЙ ЗАПАХ!

ПОХОЖЕ, ЕЁ ТОЖЕ ПРИТЯНУЛО, ПРАВДА, НЕ СИЛОЙ РАЗНОСТИ ДАВЛЕНИЙ.

**Чудеса с ложкой?!
(Опыт с подъемной силой)**



ДА, СОУС КАРРИ В ТАКИХ
РЕСТОРАНЧИКАХ ВСЕГДА
ОЧЕНЬ ВКУСНЫЙ.



Я ВОООЩЕ ОБОЖАЮ СОУС
КАРРИ, НО ЗАДЕСЬ В "МОРЕ"
ОН ПРОСТО БЕСПОДОБЕН!

ОДНАКО В ОДНОМ
МНЕ НЕ ПОВЕЗЛО.
МЯСА В МОЮ ПОРЦИЮ
ПОПАЛ ВСЕГО
ОДИН КУСОЧЕК.



шлёп!

ЭКИ-САН, У МЕНЯ
ЕСТЬ ЦАЕЯ.

НЕ ХОЧЕШЬ ЛИ ТЫ
ПОСТАВИТЬ ОПЫТ
СО СВОЕЙ ЛОЖКОЙ?



ВОТ С ЭТОЙ
ПЛАСТМАССОВОЙ
ЛОЖКОЙ.
ДАВАЙ ПРИВЯЖЕМ К НЕЙ
НИТКУ И ПОДВЕСИМ ТАК,
ЧТОБЫ НИЗ ЛОЖКИ БЫЛ
НАПРАВЛЕН ВПРАВО.



ТЕПЕРЬ, С ПОМОЩЬЮ
ЭТОГО ВЕНТИЛЯТОРА...

Вот
так



...МЫ СОЗДАДИМ
ВЕТЕР, НАПРАВЛЕННЫЙ
СВЕРХУ ВНИЗ.

ПРИ
ЭТОМ...

Течение
ветра

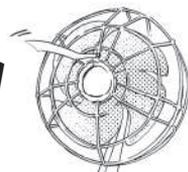
❖ШШШ





Я устала плавать
(Лобовое сопротивление)

ФШШ



КАК ХОЧЕТСЯ
ОТДОХНУТЬ! ЖАЛЬ,
ЧТО НЕТ КОМНАТЫ
ОТДЫХА.

ПЛЮХ

ДА.



ВЕДЬ КОГДА
ПЛАВАЕШЬ, ТОЖЕ
УСТАЕШЬ.

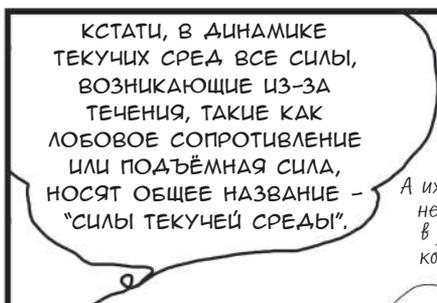
К ТОМУ ЖЕ МЫ
ПОЕЛИ, ТАК ЧТО
ДАВАЙТЕ НЕМНОГО
ОТДОХНЕМ.

Ха, ха, ха



Я ПОМНЮ, СИРАУСИ.
В МОРЕ УСТАЕШЬ, ПО-
ТОМУ ЧТО ДЕЙСТВУ-
ЕТ ЛОБОВОЕ СОПРО-
ТИВЛЕНИЕ - СИЛА, НА-
ПРАВЛЕННАЯ ПРОТИВО-
ПОЛОЖНО НАПРАВЛЕН-
НУЮ ДВИЖЕНИЯ.

ДА,
ЭТО ТАК.



КСТАТИ, В ДИНАМИКЕ
ТЕКУЩИХ СРЕД ВСЕ СИЛЫ,
ВОЗНИКАЮЩИЕ ИЗ-ЗА
ТЕЧЕНИЯ, ТАКИЕ КАК
ЛОБОВОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ
ИЛИ ПОДЪЁМНАЯ СИЛА,
НОСЯТ ОБЩЕЕ НАЗВАНИЕ -
"СИЛЫ ТЕКУЧЕЙ СРЕДЫ".

Силы текучей среды

Подъёмная
сила

Лобовое
сопротивление

А их, значит,
не приняли
в дружную
компанию.



ДА?!

Сила тяжести

Сила трения

СИЛЫ ТЕКУЧЕЙ СРЕДЫ, ДЕЙСТВУЮЩИЕ НА ТЕЛО В РЕЗУЛЬТАТЕ ТЕЧЕНИЯ, ПРОПОРЦИОНАЛЬНЫ ДИНАМИЧЕСКОМУ ДАВЛЕНИЮ, ТО ЕСТЬ КИНЕТИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ ТЕКУЧЕЙ СРЕДЫ, КОТОРАЯ РАВНА $\rho U^2/2$

ЗНАЧИТ, ЧЕМ ВЫШЕ ДИНАМИЧЕСКОЕ ДАВЛЕНИЕ, ТЕМ БОЛЬШЕ СИЛЫ ТЕКУЧЕЙ СРЕДЫ.

У МЕНЯ ВОПРОС. ПОСЛУШАЙ, СИРАУСИ. СИЛЫ ТЕКУЧЕЙ СРЕДЫ - ЭТО ПОДЪЁМНАЯ СИЛА И ЛОБОВОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ, И ЕСЛИ ТЕЧЕНИЕ СТАНОВИТСЯ БЫСТРЕЕ, ТО УВЕЛИЧАТСЯ ОБЕ ЭТИ СИЛЫ?

ДА, РАЗУМЕЕТСЯ. А ЧТО?

НО ТОГДА, НО ТОГДА!

ВЕДЬ НАМ НУЖНА ТОЛЬКО ПОДЪЁМНАЯ СИЛА, НО ЛОБОВОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ ТОЖЕ УВЕЛИЧИТСЯ?!

Подъёмная сила

Лобовое сопротивление

Ведь нужна только подъёмная сила.

КАК ЖЕ БЫТЬ?! ВЕДЬ ПОДЪЁМНАЯ СИЛА - ЭТО ДРУГ, ПОДНИМАЮЩИЙ САМОЛЁТЫ, А ЛОБОВОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ - ВРАГ, УТОМИВШИЙ МЕНЯ, КОГДА Я ПЛАВАЛА!

МОЛОДЕЦ, ЭКИ-САН! ТЫ ПРАВИЛЬНО ПОДМЕТИЛА!

ДЕЙСТВИТЕЛЬНО, ЛОБОВОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ МОЖЕТ СТРОИТЬ ПОМЕХИ, КОТОРЫЕ НЕ ДАДУТ ИСПОЛЬЗОВАТЬ ПОДЪЁМНУЮ СИЛУ.

ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЭТОЙ ДИЛЕММЫ ПРОВОДЯТСЯ РАЗЛИЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИСПОЛЬЗУЮТСЯ РАЗЛИЧНЫЕ МЕТОДЫ.

Трудная дилемма!

(Коэффициент лобового сопротивления и коэффициент подъёмной силы)

Я ВЕДЬ ТОЖЕ ХОЧУ БОЛЬШЕ ВРЕМЕНИ УДЕЛЯТЬ ТЕБЕ.

НО ТОГДА Я НЕ СМОГУ ХОРОШО ЗАРАБАТЫВАТЬ!

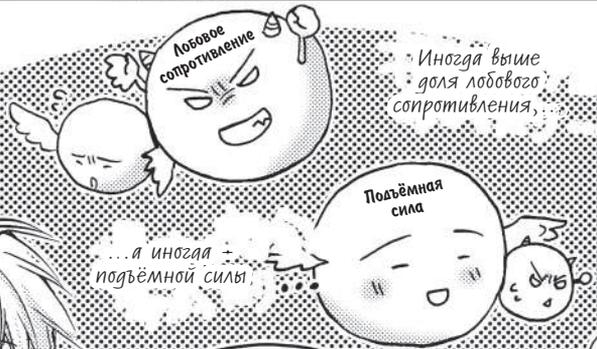
ПОЙМИ ЭТО, САТИКО!

ИТАК, ДАВАЙТЕ УГЛУБИМСЯ В ТРУДНУЮ ДИЛЕММУ ВЗАИМООТНОШЕНИЙ ЛОБОВОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ И ПОДЪЁМНОЙ СИЛЫ.

ДОЛИ, КОТОРЫЕ ЛОБОВОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ И ПОДЪЁМНАЯ СИЛА ЗАНИМАЮТ В ДИНАМИЧЕСКОМ ДАВЛЕНИИ, НАЗЫВАЮТ, СООТВЕТСТВЕННО, "КОЭФФИЦИЕНТОМ ЛОБОВОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ" И "КОЭФФИЦИЕНТОМ ПОДЪЁМНОЙ СИЛЫ". ЭТИ КОЭФФИЦИЕНТЫ ЯВЛЯЮТСЯ ФУНКЦИЯМИ ЧИСЛА РЕЙНОЛЬДСА И СИЛЬНО ИЗМЕНЯЮТСЯ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ СОСТОЯНИЯ ТЕЧЕНИЯ, ТО ЕСТЬ ОТ ТОГО, ЛАМИНАРНОЕ ЭТО ТЕЧЕНИЕ ИЛИ ТУРБУЛЕНТНОЕ.

Коэффициент лобового сопротивления

Коэффициент подъёмной силы



РЕЙНОЛЬДС!

ЭТО БЫЛ ЧЕЛОВЕК, КОТОРЫЙ СМЕШИВАЛ ЧЕРНИЛА С ВОДОЙ, АА?!

Я ПРИПОМИНАЮ, ЧТО ГРАНИЦЕЙ МЕЖДУ ЛАМИНАРНЫМ И ТУРБУЛЕНТНЫМ ТЕЧЕНИЕМ БЫЛО ЧИСЛО РЕЙНОЛЬДСА, РАВНОЕ ПРИМЕРНО 2320.

АА, ЧИСЛО РЕЙНОЛЬДСА ВООООЩЕ НЕЗАМЕНИМО ПРИ ИЗУЧЕНИИ СИЛ, ДЕЙСТВУЮЩИХ НА ТЕЛО В РЕЗУЛЬТАТЕ ТЕЧЕНИЯ.

ИТАК, СИЛЫ ТЕКУЧЕЙ СРЕДЫ, ТАКИЕ КАК ПОДЪЁМНАЯ СИЛА ИЛИ ЛОБОВОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ, ПРОПОРЦИОНАЛЬНЫ ДИНАМИЧЕСКОМУ ДАВЛЕНИЮ, А ТАКЖЕ ПЛОЩАДИ КРЫЛА A . А КОЭФФИЦИЕНТАМИ ПРОПОРЦИОНАЛЬНОСТИ СЛУЖАТ ИЛИ КОЭФФИЦИЕНТ ЛОБОВОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ, ИЛИ КОЭФФИЦИЕНТ ПОДЪЁМНОЙ СИЛЫ.

КСТАТИ, ДИНАМИЧЕСКОЕ ДАВЛЕНИЕ ПРОПОРЦИОНАЛЬНО ПЛОТНОСТИ ТЕКУЧЕЙ СРЕДЫ ρ И КВАДРАТУ СКОРОСТИ U^2 .

PPP



PPP

ПОДХОДЯЩИЙ
СЛУЧАЙ.

ДАВАЙТЕ ПОПРОБУЕМ
ПРИМЕНИТЬ ЭТО
К САМОЛЁТУ.

ОБОЗНАЧИВ КОЭФФИЦИЕНТ ЛО-
БОВОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ЗА
 C_D , КОЭФФИЦИЕНТ ПОДЪЁМ-
НОЙ СИЛЫ - ЗА C_L ...

... ПЛОТНОСТЬ ТЕКУЧЕЙ
СРЕДЫ - ЗА ρ , СКОРОСТЬ
ТЕКУЧЕЙ СРЕДЫ - ЗА U ,
И ПЛОЩАДЬ КРЫЛА -
ЗА A ...

Ага,
ага

Лобовое сопротивление : $D = C_D \left(\frac{1}{2} \rho U^2 \right) A [N]$

Подъёмная сила : $L = C_L \left(\frac{1}{2} \rho U^2 \right) A [N]$

Коэффи-
циент

Динамическое
давление

Площадь
крыла

...МЫ СМОЖЕМ НАПИСАТЬ
ВОТ ТАКИЕ ФОРМУЛЫ НАХОЖДЕНИЯ
ЛОБОВОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ
И ПОДЪЁМНОЙ СИЛЫ!

ОГО! И СКОРОСТЬ ТЕКУЧЕЙ
СРЕДЫ, И ПЛОЩАДЬ КРЫЛА,
И ПЛОТНОСТЬ ТЕКУЧЕЙ
СРЕДЫ - ВСЕ ОНИ ВХОДЯТ
СЮДА КАК МНОЖИТЕЛИ!

ДЕЙСТВИТЕЛЬНО,
ИЗ-ЗА ЭТИХ ФАКТО-
РОВ СИЛЫ ТЕКУЧЕЙ
СРЕДЫ МОГУТ Силь-
НО УВЕЛИЧИТЬСЯ.

КСТАТИ, ВОТ
ЭТА ПЛОЩАДЬ.

ПЛОЩАДЬ КАКОЙ
ЧАСТИ КРЫЛА
ЗДЕСЬ ИМЕЕТСЯ
В ВИДУ?



ИЗВИНИТЕ,
Я СОВСЕМ ЗАБЫЛ
ПРО ЭТО СКАЗАТЬ.

ЭТО "ПЛОЩАДЬ
ФРОНТАЛЬНОЙ
ПРОЕКЦИИ".

ПЛОЩАДЬ ФРОНТАЛЬ-
НОЙ ПРОЕКЦИИ - ЭТО
ПЛОЩАДЬ ПРИ ВЗГЛЯДЕ
НА ТЕЛО ПРЯМО СПЕ-
РЕДИ.

ЭКИ-САН! ВСТАНЬ-КА
У ЭТОЙ СТЕНЫ.

ШУРХ

И ЧТО?



ЕСЛИ Я СОЗДАМ В КОМНАТЕ ТЕМНОТУ И НАПРАВЛЮ СВЕТ НА ЭКИ-САН,...



Вот эта тень!

Площадь фронтальной проекции А

СМОТРИТЕ!

...У НАС ПОЛУЧИТСЯ ПЛОЩАДЬ ФРОНТАЛЬНОЙ ПРОЕКЦИИ ЭКИ-САН!



ПЛОЩАДЬЮ ФРОНТАЛЬНОЙ ПРОЕКЦИИ НАЗЫВАЕТСЯ ПЛОЩАДЬ ТЕНИ, ОБРАЗУЮЩЕЙСЯ ПОЗАДИ ТЕЛА.

Рисунок, показывающий освещение с помощью световой панели

Площадь фронтальной проекции

ЗНАЧИТ, ПОДЪЁМНАЯ СИЛА ИЛИ ЛОБОВОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ ЗАВИСЯТ ОТ ТОГО, КАК ТЕЧЕНИЕ ВОСПРИНИМАЕТСЯ НА ПЕРЕДНЕЙ ПОВЕРХНОСТИ КРЫЛА.



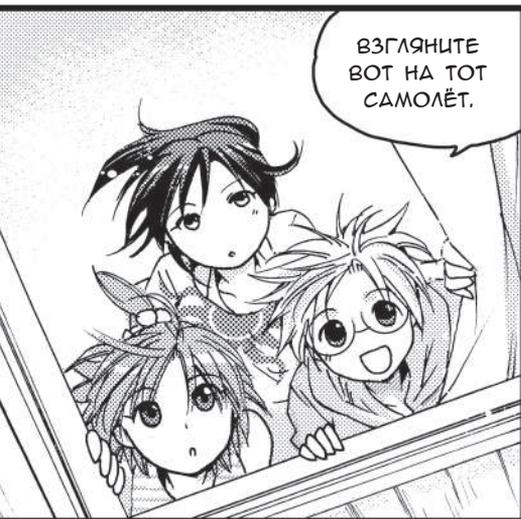
ЕСЛИ УМЕНЬШИТЬ ЭТУ ПЛОЩАДЬ ФРОНТАЛЬНОЙ ПРОЕКЦИИ, ТО ЛОБОВОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ ТОЖЕ УМЕНЬШИТСЯ, ТАК?

ДА, ДА! В ТАКОЙ ПОЗЕ ЛОБОВОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ ВЕТРУ ТОЖЕ БУДЕТ МЕНЬШЕ!

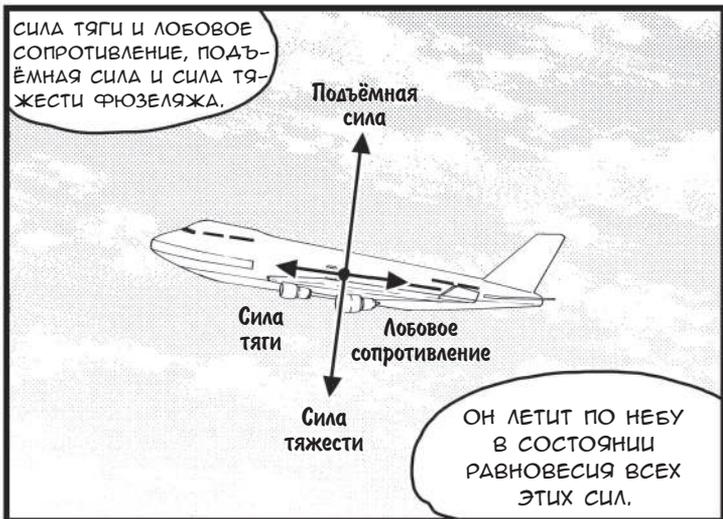


ДЛЯ САМОЛЁТА ЖЕЛАТЕЛЬНО УМЕНЬШИТЬ ЛОБОВОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ, НО ПРИ ЭТОМ ПОЛУЧИТЬ БОЛЬШУЮ ПОДЪЁМНУЮ СИЛУ.

ПОЭТОМУ ИСПОЛЬЗУЮТСЯ РАЗЛИЧНЫЕ СПОСОБЫ УМЕНЬШЕНИЯ ПЛОЩАДИ ФРОНТАЛЬНОЙ ПРОЕКЦИИ.



ВЗГЛЯНИТЕ
ВОТ НА ТОТ
САМОЛЁТ.



СИЛА ТЯГИ И ЛОБОВОЕ
СОПРОТИВЛЕНИЕ, ПОДЪ-
ЁМНАЯ СИЛА И СИЛА ТЯ-
ЖЕСТИ ФЮЗЕЛЯЖА.

ОН ЛЕТИТ ПО НЕБУ
В СОСТОЯНИИ
РАВНОВЕСИЯ ВСЕХ
ЭТИХ СИЛ.

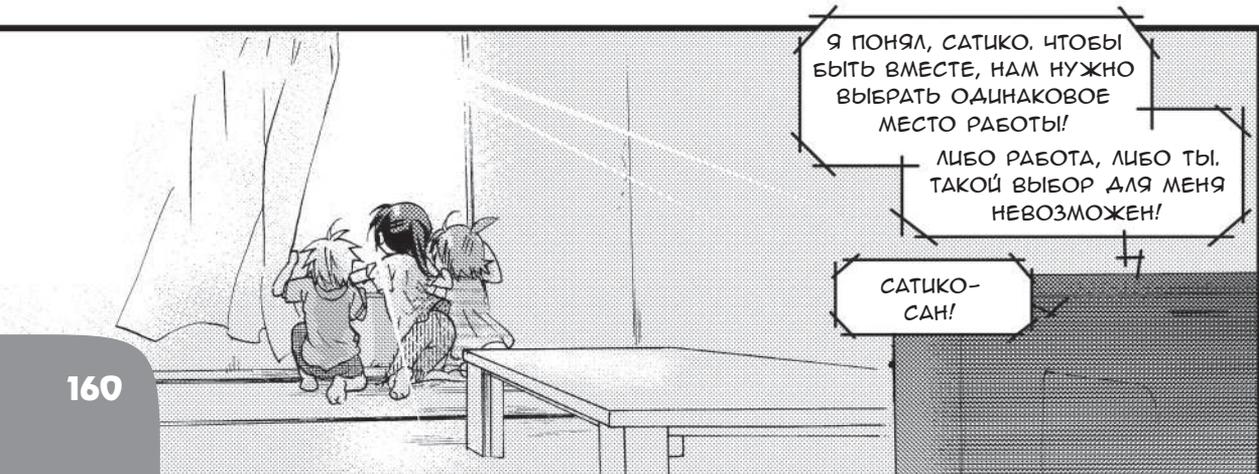


PPP

PPP

ЗНАЧИТ, НЕСМОТРА
НА НАЛИЧИЕ ДИЛЕММЫ,
ОН ЛЕТИТ, ПОДДЕРЖИВАЯ
ПРЕКРАСНЫЙ БАЛАНС.

ЕСЛИ ЗАДУМАТЬСЯ НАД ЭТИМ,
МОЖНО ПРЕДСТАВИТЬ, ЧЕРЕЗ
КАКИЕ ТРУДНОСТИ ПРИШЛОСЬ
ПРОЙТИ ДО ТОГО, КАК САМОЛЁТЫ
СМОГЛИ ВОТ ТАК ЛЕТАТЬ.



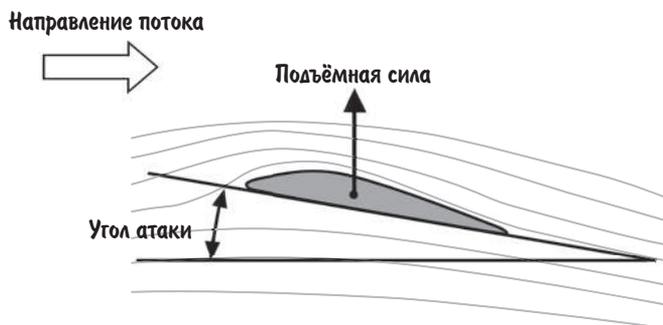
Я ПОНЯЛ, САТИКО. ЧТОБЫ
БЫТЬ ВМЕСТЕ, НАМ НУЖНО
ВЫБРАТЬ ОДИНАКОВОЕ
МЕСТО РАБОТЫ!
ЛИБО РАБОТА, ЛИБО ТЫ.
ТАКОЙ ВЫБОР ДЛЯ МЕНЯ
НЕВОЗМОЖЕН!

САТИКО-
САН!

☹ Потеря скорости?! (Угол атаки, отрыв)



ДАВАЙТЕ ЗДЕСЬ ЕЩЁ НЕМНОГО ПОГОВОРИМ О КОЭФФИЦИЕНТЕ ЛОБОВОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ И КОЭФФИЦИЕНТЕ ПОДЪЁМНОЙ СИЛЫ. КАК ПОКАЗАНО НА РИСУНКЕ НИЖЕ, НАКЛОН КРЫЛА - ЭТО УГОЛ, ВЫРАЖАЮЩИЙ СТЕПЕНЬ НАКЛОНА КРЫЛА ПО ОТНОШЕНИЮ К ПОТОКУ. ДРУГОЕ НАЗВАНИЕ ЭТОГО УГЛА - УГОЛ АТАКИ.



ВЗГЛЯНИТЕ ТАКЖЕ НА НИЖЕПРИВЕДЁННЫЙ ГРАФИК. ОН ПОКАЗЫВАЕТ СВЯЗЬ МЕЖДУ УГЛОМ АТАКИ, КОЭФФИЦИЕНТОМ ЛОБОВОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ И КОЭФФИЦИЕНТОМ ПОДЪЁМНОЙ СИЛЫ.

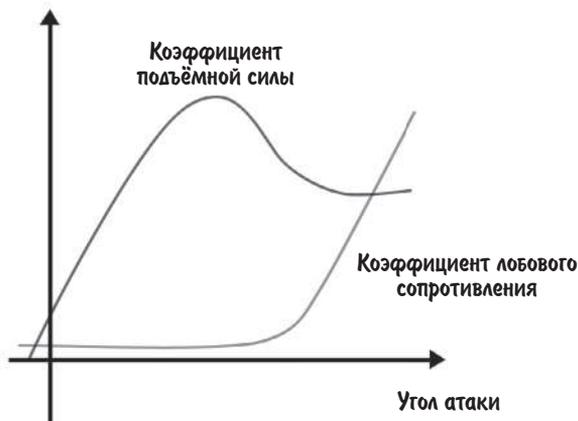


График угла атаки, коэффициента лобового сопротивления и коэффициента подъёмной силы



ВОТ КАК? ЗНАЧИТ, ПРИ УВЕЛИЧЕНИИ НАКЛОНА КРЫЛА, ТО ЕСТЬ ПРИ УВЕЛИЧЕНИИ УГЛА АТАКИ, ПОДЪЁМНАЯ СИЛА ВОЗРАСТАЕТ ДО ОПРЕДЕЛЁННОГО ЗНАЧЕНИЯ.



ОДНАКО В КАКОЙ-ТО МОМЕНТ ПОДЪЁМНАЯ СИЛА РЕЗКО СНИЖАЕТСЯ, А ЛОБОВОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ РЕЗКО ВОЗРАСТАЕТ - ОНИ МЕНЯЮТСЯ МЕСТАМИ. КАК СТРАШНО! ЧТО ВСЁ ЭТО ЗНАЧИТ?!



ИТАК, ПОЗВОЛЬТЕ МНЕ ОБЪЯСНИТЬ, ЧТО ПРОИСХОДИТ В ЭТО ВРЕМЯ! ДО ОПРЕДЕЛЁННОГО ЗНАЧЕНИЯ УГЛА АТАКИ ПОДЪЁМНАЯ СИЛА УВЕЛИЧИВАЕТСЯ. ПРИ ЭТОМ ВЕТЕР ПЛАВНО ОБТЕКАЕТ КРЫЛО.



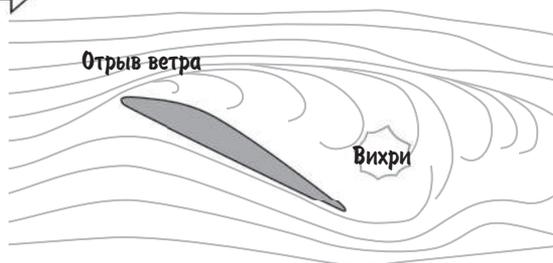
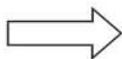
ПОНЯТНО. ТО ЕСТЬ ВЕТЕР И КРЫЛО ДРУЖАТ МЕЖДУ СОБОЙ.



ОДНАКО, КОГДА УГОЛ АТАКИ ПРЕВЫШАЕТ ОПРЕДЕЛЁННОЕ ЗНАЧЕНИЕ, ВЕТЕР БОЛЬШЕ НЕ МОЖЕТ ПЛАВНО ОБТЕКАТЬ КРЫЛО.

НАД КРЫЛОМ ПРОИСХОДИТ ЯВЛЕНИЕ ОТХОЖДЕНИЯ ПОТОКА, НАЗЫВАЕМОЕ "ОТРЫВОМ". ПРИ ЭТОМ СЗАДИ ОТ КРЫЛА ВОЗНИКАЮТ ВИХРИ.

Направление течения



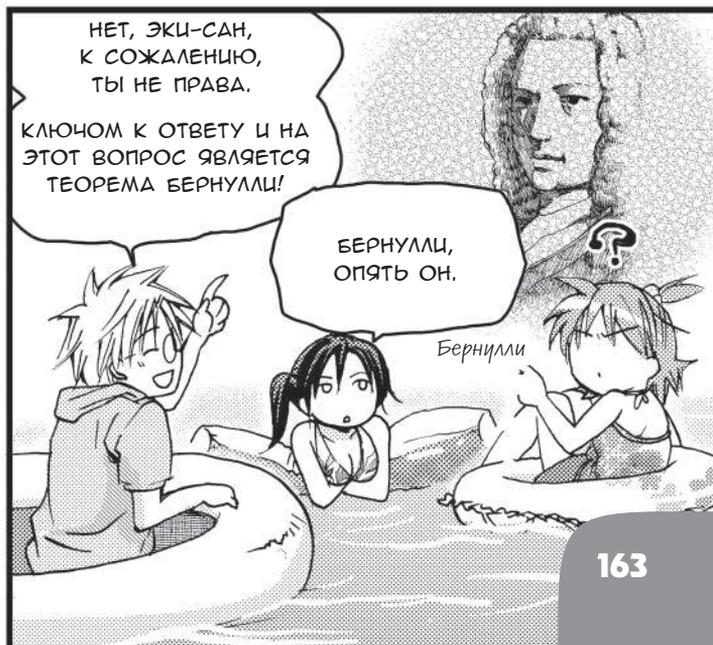
ОУ! ДА, ТАКАЯ ВЕЩЬ, КАК ВИХРИ, НЕСОМНЕННО СОЗДАСТ ПОМЕХИ ПОДЪЁМНОЙ СИЛЕ.



ПОНЯТНО. ЭТО СОСТОЯНИЕ СООТВЕТСТВУЕТ ТОМУ САМОМУ УЧАСТКУ ГРАФИКА, ГДЕ ПОДЪЁМНАЯ СИЛА СНИЖАЕТСЯ, ЛОБОВОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ ВОЗРАСТАЕТ И НАЧИНАЕТСЯ ПОТЕРЯ СКОРОСТИ. ДА, ЛЕТАЩИЙ ПО НЕБУ САМОЛЁТ НА САМОМ ДЕЛЕ ПРЕОДОЛЕВАЕТ РАЗЛИЧНЫЕ ТРУДНОСТИ.

2. СИЛЫ, ДЕЙСТВУЮЩИЕ НА ВРАЩАЮЩЕЕСЯ ТЕЛО

Почему поворачивает кручёный мяч? (Эффект Магнуса)



Теорема Бернулли (закон сохранения энергии текучей среды)

$$\frac{1}{2} \rho u^2 + p + \rho g z = \text{Константа}$$

Кинетическая
энергия

Энергия давления

Потенциальная
энергия

При условии постоянства потенциальной энергии вдоль линий тока
будет выполняться следующее:
чем быстрее течение, тем ниже давление,
и наоборот,
чем медленнее течение, тем выше давление.

А, ТОЧНО!
Я ВСПОМНИЛА!
ВСПОМНИЛА!

ТЕПЕРЬ ДАВАЙТЕ
ПОФАНТАЗИРУЕМ.

ПРЕДСТАВЬТЕ, ЧТО
СЕЙЧАС МЫ -
БЕЙСБОЛЬНЫЕ ИГРОКИ.

УРА-А-А-А!

Питчер
(подающий) -
Аканэ

Отбивающий -
Эки

Принимающий -
Сираиси

ШАРК



ПОДАЮЩИЙ -
СТАРОСТА
АКАНЭ.

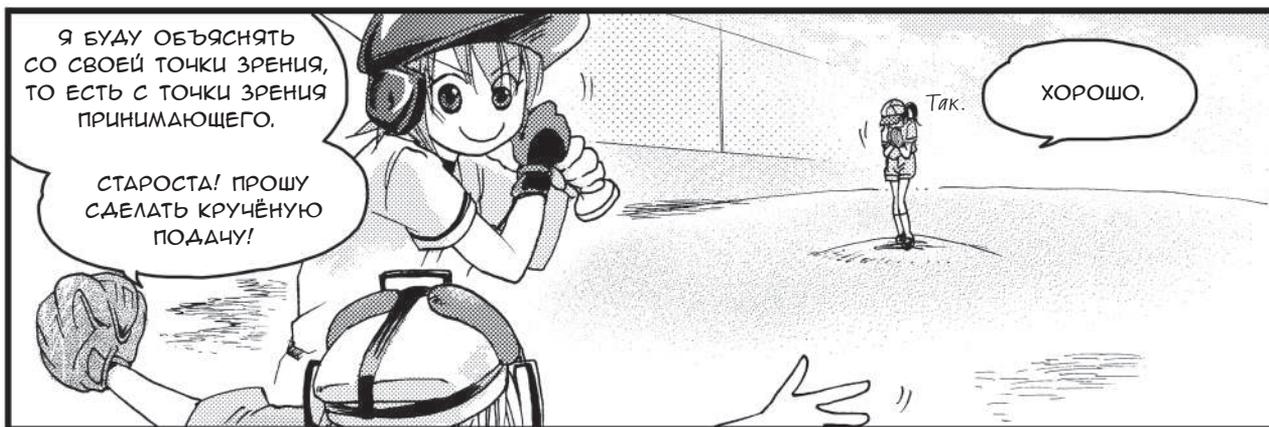
СКРИП



ОТБИВАЮЩИЙ -
ЭКИ-САН.

Я - ПРИНИМАЮЩИЙ.

ХЕ-ХЕ!
Я - ЧЕТВЁРТЫЙ
НОМЕР!



Я БУДУ ОБЪЯСНЯТЬ
СО СВОЕЙ ТОЧКИ ЗРЕНИЯ,
ТО ЕСТЬ С ТОЧКИ ЗРЕНИЯ
ПРИНИМАЮЩЕГО.

СТАРОСТА! ПРОШУ
СДЕЛАТЬ КРУЧЁНУЮ
ПОДАЧУ!

Так.

ХОРОШО.



ЭХ!

ВЖУХ



А-А!

УХ!

ФЮЦТЬ



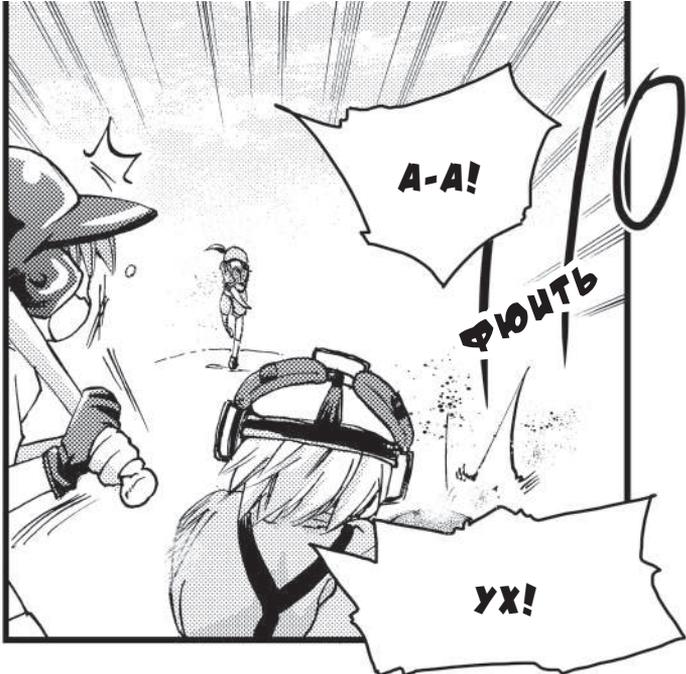
ТЫ СЕЙЧАС
ВИДЕЛА, КАК
ЛЕТЕЛ МЯЧ?

НЕТ? ТОГДА
В СЛЕДУЮЩИЙ РАЗ
СМОТРИ
ВНИМАТЕЛЬНЕЙ!



ВНИМА-
ТЕЛЬНЕЙ!

ЭТО КАК?



А-А!

ФЮНТЬ

УХ!



ШВЫРЬ

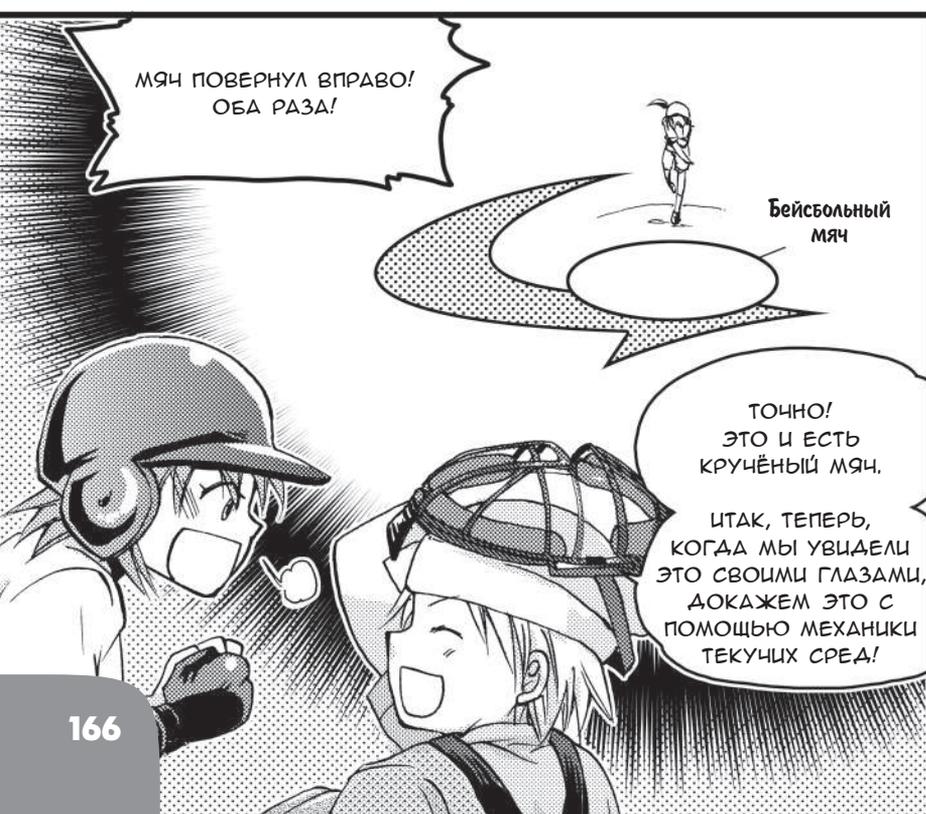
СИРАЦСИ-САН,
Я ВИДЕЛА!
Я ВИДЕЛА, ХОТЯ И НЕ
СМОГЛА ОТЕЦТЬ!



ПЫХ!

НУ ЧТО, ПОНЯЛА?

*Не думала, что потре-
буется так много сил.*



МЯЧ ПОВЕРНУЛ ВПРАВО!
ОБА РАЗА!

Бейбольный
мяч

ТОЧНО!
ЭТО И ЕСТЬ
КРУЧЕНЫИ МЯЧ.
ИТАК, ТЕПЕРЬ,
КОГДА МЫ УВИДЕЛИ
ЭТО СВОИМИ ГЛАЗАМИ,
ДОКАЖЕМ ЭТО С
ПОМОЩЬЮ МЕХАНИКИ
ТЕКУЩИХ СРЕД!



БРОСКИ СТАРОСТЫ
СНИМАЛА СВЕРХУ
ВИДЕОКАМЕРА, МЫ
МОЖЕМ ИСПОЛЬЗОВАТЬ
ЭТО ВИДЕО!

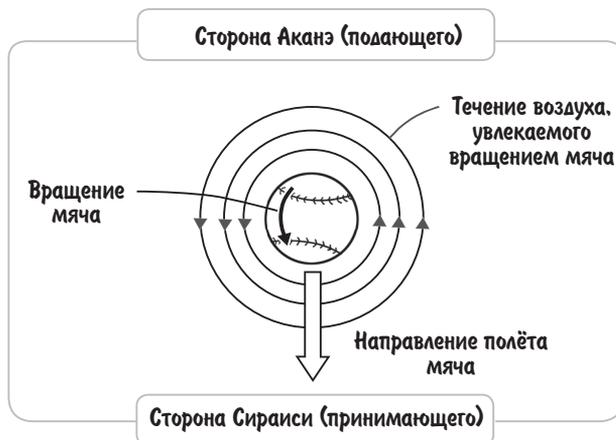
А Я И НЕ
ЗНАЛА!



И тогда мяч повернул



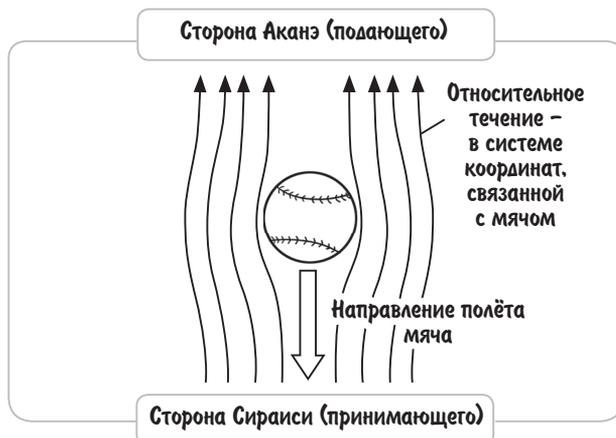
ВО-ПЕРВЫХ, ПОСМОТРИТЕ НА РИСУНОК СВЕРХУ. НА ЭТОЙ СТОРОНЕ НАХОДИЛАСЬ СТАРОСТА АКАНЭ (ПОДАЮЩИЙ), А НА ЭТОЙ - Я (ПРИНИМАЮЩИЙ). МЯЧ ПРИЛЕТЕЛ СО СТОРОНЫ АКАНЭ, НЕ ТАК ЛИ?



ДА, ДА. ТАК КАК МЯЧ КРУЧЁНЫЙ, ОН ЛЕТИТ, ВРАЩАЯСЬ ПРОТИВ ЧАСОВОЙ СРЕЛКИ.



ТЕЧЕНИЕ ВОЗДУХА, УВЛЕКАЕМОГО ВРАЩЕНИЕМ МЯЧА, ТОЖЕ БУДЕТ НАПРАВЛЕННО ПРОТИВ ЧАСОВОЙ СРЕЛКИ, НЕ ТАК ЛИ? ОДНОВРЕМЕННО С ЭТИМ СУЩЕСТВУЕТ ТЕЧЕНИЕ ОТНОСИТЕЛЬНО МЯЧА, НАПРАВЛЕННОЕ ПРОТИВОПОЛОЖНО НАПРАВЛЕНИЮ ПОЛЁТА. ЭТО СОСТОЯНИЕ ПОКАЗАНО НА РИСУНКЕ НИЖЕ.

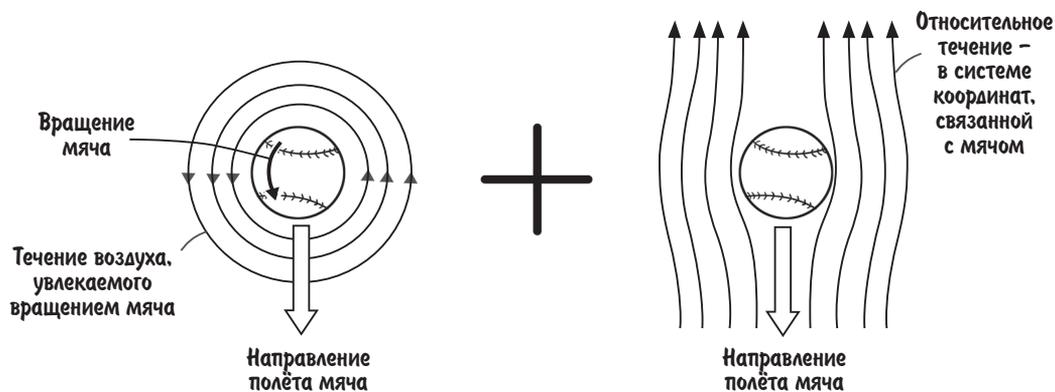




ТАК ВОТ ОНО ЧТО?! КАК МЫ УЖЕ ВИДЕЛИ В ПРИМЕРЕ С ВЕЛОСИПЕДОМ (СМ. НА СТР. 143), В СИСТЕМЕ КООРДИНАТ, СВЯЗАННОЙ С МЯЧОМ, ВЕТЕР ТЕЧЁТ СО СТОРОНЫ ОТБИВАЮЩЕГО В СТОРОНУ ПОДАЮЩЕГО.



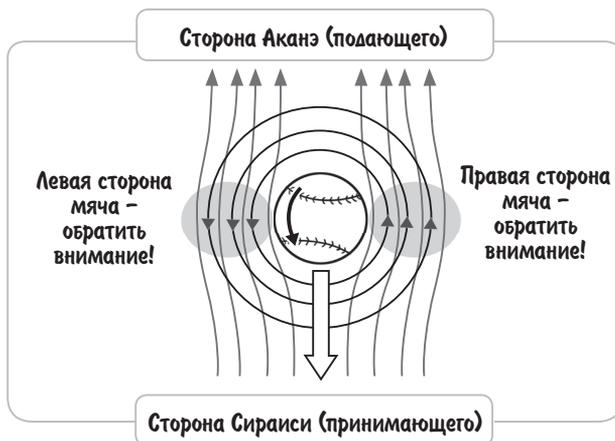
ИТАК, ТЕПЕРЬ ДАВАЙТЕ ПОПРОБУЕМ ОБЪЕДИНИТЬ ДВА ТЕЧЕНИЯ, О КОТОРЫХ Я ТОЛЬКО ЧТО РАССКАЗАЛ. КАК ВЫ ДУМАЕТЕ, ЧТО ПОЛУЧИТСЯ В РЕЗУЛЬТАТЕ?



ГОВОРИ СКОРЕЕ. Я СГОРАЮ ОТ НЕТЕРПЕНИЯ.



ИТАК! НА РИСУНКЕ НИЖЕ ПОКАЗАН РЕЗУЛЬТАТ ОБЪЕДИНЕНИЯ ДВУХ ТЕЧЕНИЙ. НУ КАК ВАМ ЭТО? НЕ ЗАМЕТИЛИ ЛИ КОЕ-ЧТО?





А! НАПРАВЛЕНИЯ СТРЕЛОК СЛЕВА И СПРАВА ОТЛИЧАЮТСЯ!



НУ ДА, ЭТО ОЧЕВИДНО.

НА ПРАВОЙ СТОРОНЕ МЯЧА:
ОТНОСИТЕЛЬНОЕ ТЕЧЕНИЕ В СИСТЕМЕ КООРДИНАТ, СВЯЗАННОЙ С МЯЧОМ,
НАПРАВЛЕННОЕ ПРОТИВ ПОЛЁТА МЯЧА, ИМЕЕТ ОДИНАКОВОЕ НАПРАВЛЕНИЕ
С ТЕЧЕНИЕМ ВОЗДУХА, УВЛЕКАЕМОГО ВРАЩЕНИЕМ МЯЧА.

НА ЛЕВОЙ СТОРОНЕ МЯЧА:
ОТНОСИТЕЛЬНОЕ ТЕЧЕНИЕ В СИСТЕМЕ КООРДИНАТ, СВЯЗАННОЙ С МЯЧОМ,
НАПРАВЛЕННОЕ ПРОТИВ ПОЛЁТА МЯЧА, ИМЕЕТ ПРОТИВОПОЛОЖНОЕ
НАПРАВЛЕНИЕ С ТЕЧЕНИЕМ ВОЗДУХА, УВЛЕКАЕМОГО ВРАЩЕНИЕМ МЯЧА.



ВЕРНО! СЛЕДОВАТЕЛЬНО, СПРАВА ОТ МЯЧА ТЕЧЕНИЕ БУДЕТ БЫСТРЫМ,
А СЛЕВА ОТ МЯЧА - МЕДЛЕННЫМ.



УГУ.



ИТАК, ЗДЕСЬ МЫ ПРИМЕНИМ ТЕОРЕМУ БЕРНУЛЛИ.

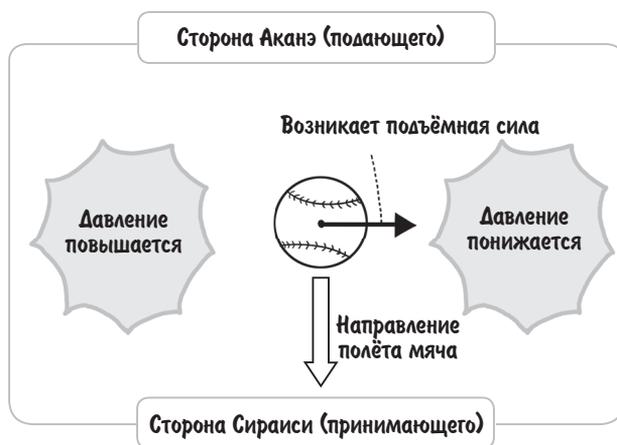
ТЕОРЕМА БЕРНУЛЛИ

ПРИ УСЛОВИИ ПОСТОЯНСТВА ПОТЕНЦИАЛЬНОЙ ЭНЕРГИИ, ВДОЛЬ ЛИНИЙ ТОКА БУДЕТ ВЫПОЛНЯТЬСЯ СЛЕДУЮЩЕЕ: ЧЕМ БЫСТРЕЕ ТЕЧЕНИЕ, ТЕМ НИЖЕ ДАВЛЕНИЕ, ЧЕМ МЕДЛЕННЕЕ ТЕЧЕНИЕ, ТЕМ ВЫШЕ ДАВЛЕНИЕ.

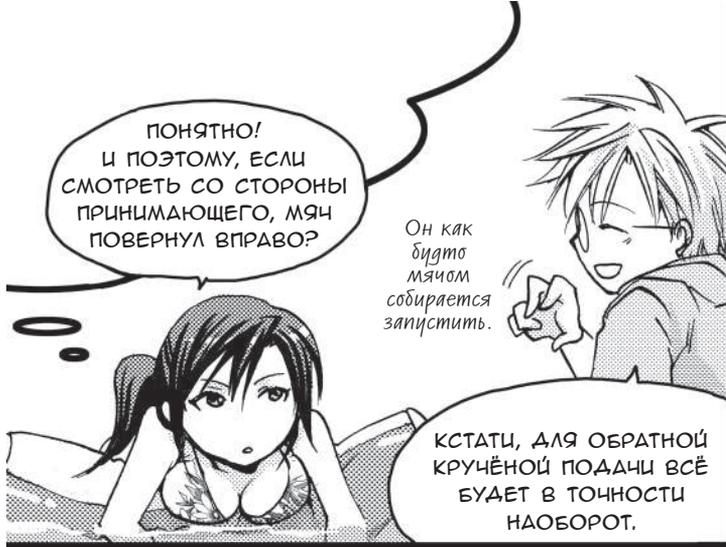
ДРУГИМИ СЛОВАМИ, НА ПРАВОЙ СТОРОНЕ МЯЧА ДАВЛЕНИЕ ПОНИЗИТСЯ, А НА ЛЕВОЙ СТОРОНЕ - ПОВЫСИТСЯ.



ТО ЕСТЬ ЗДЕСЬ ТОЖЕ ДЕЛО В РАЗНОСТИ ДАВЛЕНИЙ!
ЗНАЧИТ, ЭТО - ПОДЪЁМНАЯ СИЛА, ДА?!



СОВЕРШЕННО ВЕРНО! ЗДЕСЬ ВОЗНИКАЕТ ПОДЪЁМНАЯ СИЛА. НА МЯЧ ДЕЙСТВУЕТ СИЛА, НАПРАВЛЕННАЯ ОТ ЛЕВОЙ СТОРОНЫ, ГДЕ ДАВЛЕНИЕ ВЫСОКОЕ, К ПРАВОЙ СТОРОНЕ, ГДЕ ДАВЛЕНИЕ НИЗКОЕ, И ПОД ДЕЙСТВИЕМ ЭТОЙ СИЛЫ МЯЧ ПОВОРАЧИВАЕТ.



ПОНЯТНО!
И ПОЭТОМУ, ЕСЛИ
СМОТРЕТЬ СО СТОРОНЫ
ПРИНИМАЮЩЕГО, МЯЧ
ПОВЕРНУЛ ВПРАВО?

Он как
будто
мячом
собирается
запустить.

КСТАТИ, ДЛЯ ОБРАТНОЙ
КРУЧЁНОЙ ПОДАЧИ ВСЁ
БУДЕТ В ТОЧНОСТИ
НАОБОРОТ.



ОКАЗЫВАЕТСЯ, ПРИНЦИП
КРУЧЁНОГО МЯЧА ЗАКЛЮЧАЛСЯ
В ПОДЪЁМНОЙ СИЛЕ.

Ха-ха-ха

ДА, МЕХАНИКА ТЕКУЩИХ
СРЕД ИМЕЕТ ОТНОШЕНИЕ
ДАЖЕ К СПОРТУ.

ТАКОЕ ЯВЛЕНИЕ, КОГДА ПРИ ВРАЩЕНИИ МЯЧА,
НАХОДЯЩЕГОСЯ ВНУТРИ ОДНОРОДНОГО
ТЕЧЕНИЯ, ВОЗНИКАЕТ ПОДЪЁМНАЯ СИЛА,
НАЗЫВАЕТСЯ "ЭФФЕКТОМ МАГНУСА".

Эффект Магнуса



ДА, ЭФФЕКТ МАГНУСА -
ЭТО ЗВУЧИТ СИЛЬНО!

ИМЕННО ЕГО ИСПОЛЬЗУЕТ
ПОДАЮЩИЙ, КОГДА ОН СВОЕЙ
КРУЧЁНОЙ ПОДАЧЕЙ СБЫВАЕТ
ОТВЫВАЮЩЕГО С НОГ!



ТЕПЕРЬ, КОГДА ВЫ ПОНЯЛИ
ПРИЧИНУ, ПО КОТОРОЙ
ПОВОРАЧИВАЕТ МЯЧ, ДАВАЙТЕ
ПОПРОБУЕМ ЕЩЁ РАЗ!

НУ, ТЕПЕРЬ-ТО Я СМОГУ
ОТБИТЬ ПОДАЧУ АКАНЭ!

ВУХ

НУ НЕТ, Я НЕ ХОЧУ.

3. ОТРЫВ ТЕЧЕНИЯ

💧 Искраплённое лучше, чем гладкое?!

(Снижение сопротивления воздуха)



И НАКОНЕЦ, ПОСЛЕДНЕЕ! ДАВАЙТЕ РАЗГАДАЕМ ЗАГАДКУ: "ПОЧЕМУ У МЯЧКА ДЛЯ ГОЛЬФА ИСКРАПЛЁННАЯ ПОВЕРХНОСТЬ?".



ДА! КОГДА КАТАЕШЬ ЕГО БОСОЙ НОГОЙ, ПОЛУЧАЕТСЯ ОЧЕНЬ ПРИЯТНЫЙ МАССАЖ СТУПНИ. Я ДУМАЮ, ЧТО ЕГО ДЕЛАЮТ ИСКРАПЛЁННЫМ ИМЕННО ПОЭТОМУ!



СИРАИСИ, НУЖЕН НАМЁК.



ХОРОШО. ПО ПОВОДУ ЭТИХ ВПАДИНОК ЕСТЬ ОДИН ИНТЕРЕСНЫЙ ЭПИЗОД. РАНЬШЕ МЯЧ ДЛЯ ГОЛЬФА БЫЛ ПРОСТО КУСОК РЕЗИНЫ ИЛИ КАУЧУКА, И ЕГО ПОВЕРХНОСТЬ БЫЛА ГЛАДКОЙ. ОДНАКО ОДНАЖДЫ КТО-ТО ЗАМЕТИЛ, ЧТО СТАРЫЕ МЯЧИ, С ЦАРАПИНАМИ И ЗАУСЕНЦАМИ, ЛЕТЯТ ДАЛЬШЕ НОВЫХ. ВОТ ОТСЮДА И ПОШЁЛ ОБЫЧАЙ ДЕЛАТЬ ПОВЕРХНОСТЬ МЯЧА ИСКРАПЛЁННОЙ. ЭТО НАЗЫВАЕТСЯ "ЭФФЕКТОМ ВПАДИНОК" (DIMPLE).



ВОТ КАК! ЗНАЧИТ У СОВРЕМЕННОГО МЯЧКА ДЛЯ ГОЛЬФА ЕСТЬ СЕКРЕТ РОЖДЕНИЯ.



УВЕЛИЧЕНИЕ ДАЛЬНОСТИ ПОЛЁТА. ЭТО, НАВЕРНОЕ, СВЯЗАНО С УВЕЛИЧЕНИЕМ ПОДЪЁМНОЙ СИЛЫ И УМЕНЬШЕНИЕМ ЛОБОВОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ?



ИМЕННО ТАК! ЗДЕСЬ Я ПОДРОБНО РАССКАЖУ ВАМ ОБ УМЕНЬШЕНИИ СОПРОТИВЛЕНИЯ ВОЗДУХА.



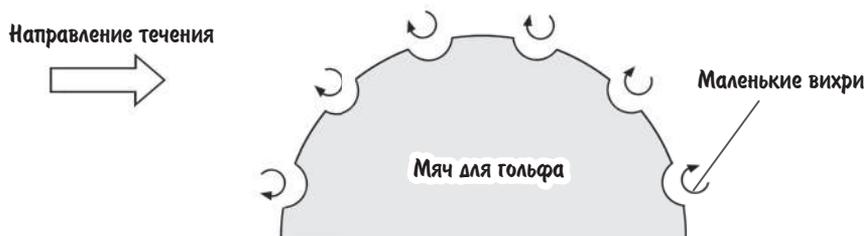
ВОТ КАК? ОДНАКО, ЕСЛИ ПОДУМАТЬ, ЭТО КАЖЕТСЯ СТРАННЫМ. ВЕДЬ НА ПЕРВЫЙ ВЗГЛЯД, СОПРОТИВЛЕНИЕ ВОЗДУХА ДОЛЖНО БЫТЬ МЕНЬШЕ У МЯЧА С ГЛАДКОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ.



АА. МНЕ ТОЖЕ ТАК КАЖЕТСЯ.



ДА, ЭТО ТАК. СЕЙЧАС У НАС БУДЕТ НЕМНОЖКО СЛОЖНЫЙ РАЗГОВОР. БЛАГОДАРЯ ЭТИМ ВПАДИНКАМ, НА ПОВЕРХНОСТИ МЯЧА ФОРМИРУЮТСЯ "МАЛЕНЬКИЕ ВИХРИ".



Маленькие вихри на поверхности мяча для гольфа



МАЛЕНЬКИЕ ВИХРИ?! ЧТО ЗА ЕРУНДА! ЕСЛИ БЫ ТАМ БЫЛИ ВИХРИ, ТО ТЕЧЕНИЕ ВОЗДУХА У ПОВЕРХНОСТИ МЯЧИКА ПРИШЛО БЫ В ПОЛНЫЙ БЕСПОРЯДОК, НЕ ТАК ЛИ?



ДА. БЛАГОДАРЯ ЭТИМ МАЛЕНЬКИМ ВИХРЯМ ТЕЧЕНИЕ У ПОВЕРХНОСТИ МЯЧА СТАНОВИТСЯ "ТУРБУЛЕНТНЫМ". ЭТО БЕСПОРЯДОЧНОЕ ТЕЧЕНИЕ, О КОТОРОМ Я ВАМ УЖЕ РАССКАЗЫВАЛ (СМ. НА СТР. 114).



ЭТО НЕПОНЯТНО. ЗАЧЕМ НУЖНО СПЕЦИАЛЬНО СОЗДАВАТЬ ТУРБУЛЕНТНОЕ ТЕЧЕНИЕ?



ХИ-ХИ-ХИ. НА ЭТО ЕСТЬ ОЧЕНЬ ГЛУБОКАЯ ПРИЧИНА. ЧТОБЫ РАЗГАДАТЬ ЭТУ ЗАГАДКУ МЯЧА ДЛЯ ГОЛЬФА, ПОТРЕБУЮТСЯ ЗНАНИЯ МЕХАНИКИ ТЕКУЩИХ СРЕД, ПОЛУЧЕННЫЕ ВАМИ РАНЕЕ. ЕСЛИ ВЫ ИСПОЛЬЗУЕТЕ ИХ, ТО НЕПРЕМЕННО СМОЖЕТЕ НАЙТИ ОТВЕТ! ДАЛЬШЕ МНЕ ПРИДЁТСЯ МНОГО ВАМ ОБЪЯСНЯТЬ, НО СПЕШИТЬ МЫ НЕ БУДЕМ.

☹️ **Страшное событие в маленьком мирке?! (Отрыв)**



ПУСТЬ У НАС ЕСТЬ ТЕЛО, ПОМЕЩЁННОЕ ВНУТРЬ ТЕЧЕНИЯ. В ЭТОМ СЛУЧАЕ, НА ОЧЕНЬ БЛИЗКОМ ОТ ТЕЛА РАССТОЯНИИ ВОЗНИКАЕТ ОБЛАСТЬ, В КОТОРОЙ ТЕЧЕНИЕ БУДЕТ ЗАМЕДЛЯТЬСЯ. ЭТУ ОБЛАСТЬ НАЗЫВАЮТ "ПОГРАНИЧНЫМ СЛОЕМ".

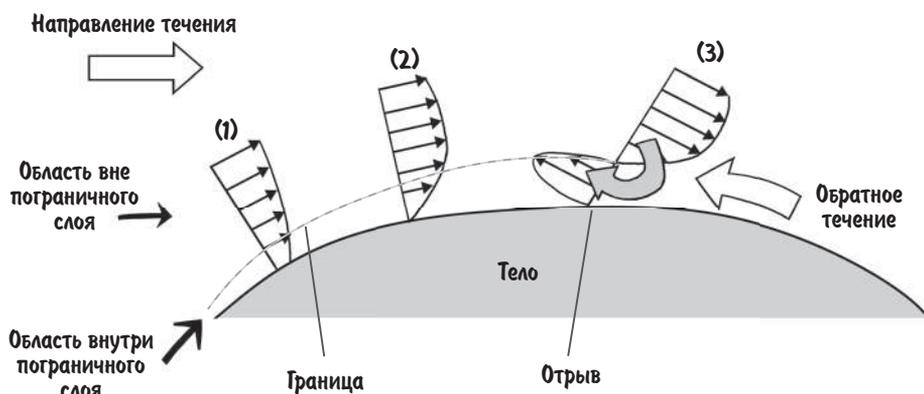
КСТАТИ, ЭТОТ ПОГРАНИЧНЫЙ СЛОЙ ОЧЕНЬ ТОНОК. В СЛУЧАЕ С МЯЧОМ ДЛЯ ГОЛЬФА, НАПРИМЕР, ОН СОСТАВЛЯЕТ НЕ БОЛЕЕ 1 ММ.



НИЧЕГО СЕБЕ! КАКОЙ МАЛЕНЬКИЙ МИРОК!



ТЕЧЕНИЕ ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ ВОЗНИКАЕТ ИЗ-ЗА ЭФФЕКТА ВЯЗКОСТИ. СВОЙСТВА ТЕЧЕНИЯ ВНУТРИ И ВНЕ ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ БУДУТ СИЛЬНО ОТЛИЧАТЬСЯ МЕЖДУ СОБОЙ, НЕ ПРАВДА ЛИ?



Распределение скоростей текучей среды в окрестностях пограничного слоя



ДЕЙСТВИТЕЛЬНО. ВЗГЛЯД НА (1) И (2) ДАЁТ ПОНЯТЬ, ЧТО ВНЕ ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ ИЗМЕНЕНИЕ СКОРОСТИ ТЕКУЧЕЙ СРЕДЫ МАЛО, А ВНУТРИ ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ СКОРОСТЬ ТЕКУЧЕЙ СРЕДЫ ИЗМЕНЯЕТСЯ РЕЗКО.



А НА УЧАСТКЕ (3) У ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ ТЕЧЕНИЕ ИЗЛАМЫВАЕТСЯ И СТАНОВИТСЯ ОБРАТНЫМ!



ТАК КАК ВНУТРИ ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ ГРАДИЕНТ СКОРОСТИ ВЕЛИК, КИНЕТИЧЕСКАЯ ЭНЕРГИЯ ТЕКУЧЕЙ СРЕДЫ ТЕРЯЕТСЯ ИЗ-ЗА СИЛЫ ВЯЗКОСТИ.



ДА, Я ПОМНЮ. ЕСЛИ ГРАДИЕНТ СКОРОСТИ БОЛЬШОЙ, ТО УВЕЛИЧИВАЕТСЯ СИЛА ВЯЗКОСТИ, ЗАТРУДНЯЮЩАЯ ТЕЧЕНИЕ (СМ НА СТР. 108).



ПРАВИЛЬНО! И ЭТО ПРИВОДИТ К ТОМУ, ЧТО СКОРОСТЬ ТЕКУЧЕЙ СРЕДЫ ВНУТРИ ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ РЕЗКО УМЕНЬШАЕТСЯ. УМЕНЬШЕНИЕ СКОРОСТИ ТЕКУЧЕЙ СРЕДЫ – ЭТО ОЗНАЧАЕТ ТО, ЧТО ДАВЛЕНИЕ ВНУТРИ ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ УВЕЛИЧИВАЕТСЯ.



ВДОЛЬ ЛИНИЙ ТОКА ПРИ УМЕНЬШЕНИИ СКОРОСТИ ТЕКУЧЕЙ СРЕДЫ УВЕЛИЧИВАЕТСЯ ДАВЛЕНИЕ! ЭТО ТЕОРЕМА БЕРНУЛЛИ, ДА?



С ДРУГОЙ СТОРОНЫ, ВНЕ ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ УСЛОВИЯ БЛИЗКИ К ИДЕАЛЬНОЙ ТЕКУЧЕЙ СРЕДЕ, НЕ ОБЛАДАЮЩЕЙ ВЯЗКОСТЬЮ. ПОТЕРИ КИНЕТИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ МАЛЫ, И СОХРАНЯЕТСЯ ОДНОРОДНАЯ СКОРОСТЬ ТЕКУЧЕЙ СРЕДЫ.



ОЙ! У МЕНЯ ТАКОЕ ЧУВСТВО, ЧТО ЭТА РАССОГЛАСОВАННОСТЬ ДОБРОМ НЕ КОНЧИТСЯ.



СЛЕДОВАТЕЛЬНО, ЧЕМ НИЖЕ ПО ТЕЧЕНИЮ В ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ, ТЕМ БОЛЕЕ ЗАТРУДНЕНО ОБТЕКАНИЕ ТЕЛА: ТАМ ФОРМИРУЮТСЯ "БОЛЬШИЕ ВИХРИ ОТРЫВА", ОТХОДЯЩИЕ ОТ ПОВЕРХНОСТИ ТЕЛА. ЭТО СОСТОЯНИЕ НАЗЫВАЮТ ОТРЫВОМ ПОТОКА – ОНО СООТВЕТСТВУЕТ УЧАСТКУ (3) НА НАШЕМ РИСУНКЕ.



А! А ВЕДЬ ТЫ УЖЕ ГОВОРИЛ ПРО ЭТОТ ОТРЫВ, КОГДА РАССКАЗЫВАЛ О НАКЛОНЕ КРЫЛА САМОЛЁТА, НЕ ТАК ЛИ? (СМ. НА СТР. 162)



КСТАТИ, "ОТРЫВ" ОЗНАЧАЕТ "ОТДЕЛЕНИЕ ТЕЧЕНИЯ".



ОТДЕЛЕНИЕ ТЕЧЕНИЯ? И К ЧЕМУ ЖЕ ОНО ПРИВОДИТ?



ХИ-ХИ-ХИ. ЭТО ПРИВОДИТ К СЕРЬЁЗНЫМ ПОСЛЕДСТВИЯМ. КОГДА ПРОИСХОДИТ ОТРЫВ, ЛОБОВОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ РЕЗКО УВЕЛИЧИВАЕТСЯ. ПОМНИТЕ, ЧТО ЕСЛИ ОТРЫВ ПРОИСХОДИТ НА КРЫЛЕ САМОЛЁТА, ТО ПОДЪЁМНАЯ СИЛА ПАДАЕТ, ЛОБОВОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ ВОЗРАСТАЕТ, И ПРОИСХОДИТ РЕЗКАЯ ПОТЕРЯ СКОРОСТИ, НЕ ТАК ЛИ?



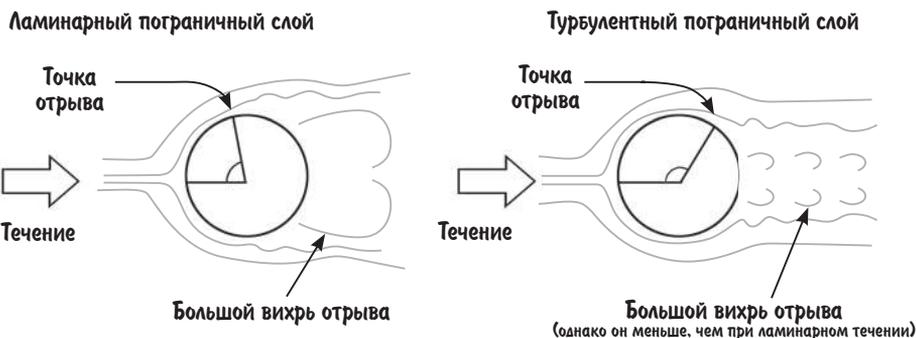
КАК СТРАШНО! ОТРЫВ - ЭТО ПЛОХАЯ ВЕЩЬ. ЗНАЧИТ, ДАЖЕ В НЕВЯЦАММОМ ГЛАЗУ МАЛЕНЬКОМ МИРЕ ПРОИСХОДЯТ ТАКИЕ УЖАСНЫЕ СОБЫТИЯ.



НУ, ДА. И НАОБОРОТ, ЧТОБЫ УВЕЛИЧИТЬ ПОДЪЁМНУЮ СИЛУ И УМЕНЬШИТЬ ЛОБОВОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ, ВАЖНО СДЕЛАТЬ ТАК, ЧТОБЫ ОТРЫВ НЕ ПРОИСХОДИЛ.



ПРАВИЛЬНО! ВОТ ТАК МЫ ПОСТЕПЕННО ПРИБЛИЖАЕМСЯ К РАЗГДАКЕ. ИТАК, ТЕПЕРЬ ВЗГЛЯНИТЕ НА РИСУНКИ НИЖЕ. ПОЗИЦИИ ОТРЫВА ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ, КОТОРЫЕ НАЗЫВАЮТСЯ "ТОЧКАМИ ОТРЫВА", ОТЛИЧАЮТСЯ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ТОГО, ЛАМИНАРНЫМ ИЛИ ТУРБУЛЕНТНЫМ ЯВЛЯЕТСЯ ПОГРАНИЧНЫЙ СЛОЙ.



Отрыв пограничного слоя



ДА, ДА. В САМОМ ДЕЛЕ!
ПРИ ТУРБУЛЕНТНОМ ТЕЧЕНИИ ОТРЫВ ПРОИСХОДИТ ДАЛЬШЕ, ТО ЕСТЬ НИЖЕ ПО ТЕЧЕНИЮ, ЧЕМ ПРИ ЛАМИНАРНОМ, ДА?

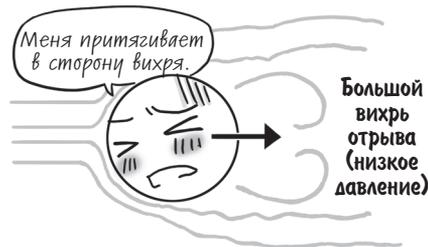


ВЕРНО. КОГДА СОСТОЯНИЕ ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ МЕНЯЕТСЯ С ЛАМИНАРНОГО НА ТУРБУЛЕНТНОЕ, УГОЛ ТОЧКИ ОТРЫВА РЕЗКО УВЕЛИЧИВАЕТСЯ. КАК ВИДНО НА РИСУНКЕ, ПРИ ЛАМИНАРНОМ ТЕЧЕНИИ ОН СОСТАВЛЯЕТ 85° , А ПРИ ТУРБУЛЕНТНОМ - УЖЕ 110° .

ИТАК, ТЕПЕРЬ МЫ ОБРАТИМ ВНИМАНИЕ НА "БОЛЬШОЙ ВИХРЬ ОТРЫВА", ФОРМИРУЮЩИЙСЯ В НИЖНЕЙ ЧАСТИ ОТОРВАВШЕГОСЯ ПОТОКА. КОГДА ОБРАЗУЕТСЯ "БОЛЬШОЙ ВИХРЬ ОТРЫВА", ДАВЛЕНИЕ Понижается, В РЕЗУЛЬТАТЕ ЧЕГО ВОЗНИКАЕТ СОПРОТИВЛЕНИЕ.

Течение отрывается от поверхности тела.

В нижней части оторвавшегося течения формируется «большой вихрь отрыва», давление понижается, что создаёт «сопротивление».



ТЕПЕРЬ ЕЩЁ РАЗ ВЗГЛЯНИТЕ НА НАШ РИСУНОК. ПРИ КАКОМ ТЕЧЕНИИ "БОЛЬШОЙ ВИХРЬ ОТРЫВА" В НИЖНЕЙ ЧАСТИ ТЕЧЕНИЯ БУДЕТ МЕНЬШЕ - ПРИ ЛАМИНАРНОМ ИЛИ ПРИ ТУРБУЛЕНТНОМ?



АГА! "БОЛЬШОЙ ВИХРЬ ОТРЫВА", ВОЗНИКАЮЩИЙ ПРИ ТУРБУЛЕНТНОМ ТЕЧЕНИИ, БУДЕТ МЕНЬШЕ, ЧЕМ ПРИ ЛАМИНАРНОМ!



ВОТ ИМЕННО. КОГДА ПОГРАНИЧНЫЙ СЛОЙ СТАНОВИТСЯ ТУРБУЛЕНТНЫМ, ТОЧКА ОТРЫВА СМЕЩАЕТСЯ ВНИЗ ПО ТЕЧЕНИЮ, ПОЭТОМУ "БОЛЬШОЙ ВИХРЬ ОТРЫВА" СТАНОВИТСЯ МЕНЬШЕ, ЧЕМ ОН БЫЛ ПРИ ЛАМИНАРНОМ ТЕЧЕНИИ.



А ЕСЛИ "БОЛЬШОЙ ВИХРЬ ОТРЫВА" СТАНОВИТСЯ МАЛЕНЬКИМ, ТО "СОПРОТИВЛЕНИЕ" ТОЖЕ УМЕНЬШАЕТСЯ. ПОЛУЧАЕТСЯ, ЧТО ТУРБУЛЕНТНОЕ ТЕЧЕНИЕ ЛУЧШЕ?

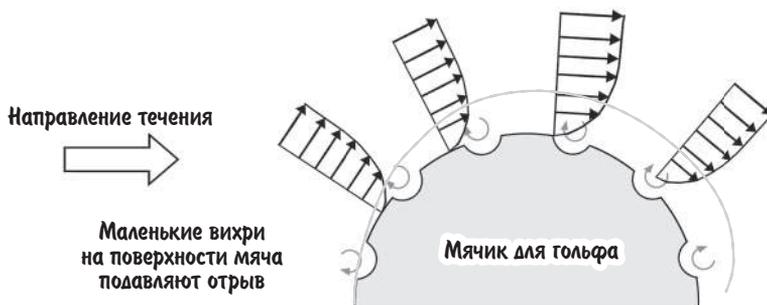


КАЖЕТСЯ, ТЫ ГОВОРИЛ, ЧТО ТУРБУЛЕНТНОЕ ТЕЧЕНИЕ СОЗДАЁТСЯ
ВПАДИНКАМИ НА МЯЧИКЕ ДЛЯ ГОЛЬФА.



ИМЕННО ТАК! ЦТАК, ВЕРНЁМСЯ К РАЗГОВОРУ ПРО МЯЧИК ДЛЯ ГОЛЬФА.
ВПАДИНКИ НА ЕГО ПОВЕРХНОСТИ НУЖНЫ ДЛЯ ТОГО, ЧТОБЫ ПРЕВРАЩАТЬ
ТЕЧЕНИЕ У ПОВЕРХНОСТИ В БЕСПОРЯДОЧНОЕ ТЕЧЕНИЕ, НАЗЫВАЕМОЕ
"ТУРБУЛЕНТНЫМ", НЕ ТАК ЛИ?

КОГДА ТЕЧЕНИЕ НА ПОВЕРХНОСТИ МЯЧА СТАНОВИТСЯ ТУРБУЛЕНТНЫМ,
ПОЗИЦИЯ ОТРЫВА СМЕЩАЕТСЯ ДАЛЬШЕ НАЗАД.



Картина предотвращения отрыва впадинками



А, Я СТАЛА НЕМНОЖКО ПОНИМАТЬ! ТО ЕСТЬ ВПАДИНКИ СПОСОБСТВУЮТ
ЗАВОРАЧИВАНИЮ ВОЗДУХА В ОБЛАСТЬ ПОЗАДИ МЯЧА И ИЗ-О ВСЕХ СИЛ
ПОДАВЛЯЮТ ОТРЫВ, ТАК? ПОТОМУ ЧТО ОТРЫВ - ЭТО ПЛОХО.



ЯСНО. ДЕЙСТВИТЕЛЬНО, ТЫ ГОВОРИЛ ВНАЧАЛЕ, ЧТО БЛАГОДАРЯ ВПАДИНКАМ
УМЕНЬШАЕТСЯ СОПРОТИВЛЕНИЕ ВОЗДУХА.



ПОАВЕДЁМ ИТОГ ВСЕМУ СКАЗАННОМУ:
"ВПАДЦИНКИ СОЗДАЮТ МАЛЕНЬКИЕ ВИХРИ, ПРЕВРАЩАЯ ТЕЧЕНИЕ
ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ В ТУРБУЛЕНТНОЕ. И БЛАГОДАРЯ ЭТОЙ
НЕУПОРЯДОЧЕННОСТИ ТЕЧЕНИЯ ПОДАВЛЯЕТСЯ ОТРЫВ."



ПУТЁМ СОЗДАНИЯ "МАЛЕНЬКИХ ВИХРЕЙ" ВОКРУГ МЯЧА УМЕНЬШАЮТ
"БОЛЬШОЙ ВИХРЬ ОТРЫВА" ПОЗАДИ МЯЧА, ТЕМ САМЫМ СНИЖАЯ
СОПРОТИВЛЕНИЕ ВОЗДУХА. АА, ЭТО КАЖЕТСЯ НЕМНОЖКО ЗАПУТАННЫМ, НО
НА САМОМ ДЕЛЕ ДОВОЛЬНО ИНТЕРЕСНО.



АА, АА! Я СНАЧАЛА НЕ ПОНЯЛА, ЗАЧЕМ СОЗДАЮТ ТУРБУЛЕНТНОЕ ТЕЧЕНИЕ,
ВЫЗЫВАЯ "МАЛЕНЬКИЕ ВИХРИ", НО ТЕПЕРЬ ДО МЕНЯ ДОШЛО.
ТАК ВОТ КАКАЯ ТАЙНА СКРЫВАЛАСЬ ВО ВПАДЦИНКАХ МЯЧИКА ДЛЯ ГОЛЬФА.



РАЗМЫШЛЯЯ НАД ЭТОЙ ЗАГАДКОЙ, МЫ ВСПОМНИЛИ ПРО ПОДЪЁМНУЮ СИЛУ,
ЛОБОВОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ, ЛАМИНАРНОЕ И ТУРБУЛЕНТНОЕ ТЕЧЕНИЯ, ТЕОРЕМУ
БЕРНУЛЛИ, ВЯЗКОСТЬ И ДРУГОЕ, НЕ ТАК ЛИ?



АА. ТЫ ОЧЕНЬ ПРАВИЛЬНО СДЕЛАЛ, ЧТО ОСТАВИЛ ЕЁ НАПОСЛЕДОК.

ДА, МОРЕ
ВЕЧЕРОМ...

...ВЫЗЫВАЕТ ТО ЛИ ПЕЧАЛЬ,
ТО ЛИ НОСТАЛЬГИЮ.

ОТ НЕГО КАК-ТО ЩЕМИТ
НА СЕРАЦЕ.

ПЛЕСЬ

ДА, НЕ ТАК ЛИ?

К ТОМУ ЖЕ,
ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ
НАШЕГО КРУЖКА...

...ЗАКАНЧИВАЕТСЯ
НА ЭТОМ.

ВАМ ЕЩЁ
НЕ НАДОЕЛО
ЗДЕСЬ
ТОРЧАТЬ?!

ПОЙДУ-КА
Я ДОМОЙ!

ОУ!

ДА,
ПОЙДЁМТЕ.



Семь месяцев спустя

СТАРОСТА!

СТАРОСТА АКАНЭ!

Вру-
че-
ние
атте-
став-
тов



ПОЗДРАВЛЯЮ С ОКОНЧАНИЕМ
СТАРШЕЙ ШКОЛЫ!
А ТАКЖЕ С УСПЕШНЫМ
ПОСТУПЛЕНИЕМ
В УНИВЕРСИТЕТ!

АА, ОНА
МОЛОДЕЦ.
Ничего
не скажешь



СИРАИЦИ, А КАК
ТАМ ПОЖИВАЕТ
ЭКИ?

шУ,шУ

шУ,шУ

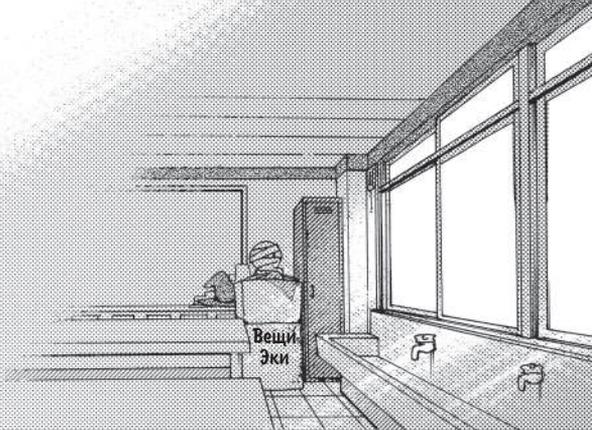
шУ,шУ

А...

ЭКИ-САН?!

ОНА ЖАЁТ
В ДУАЦТОРИИ.

АКАНЭ, ПОИДЕМ К НЕЙ!



АА, ЗДЕСЬ ВСЁ
ТАК ЖЕ, КАК
В ПЕРВОЙ
ЧЕТВЕРТИ...



Я КАК РАЗ ХОТЕЛА ЗАЙТИ
СЮДА НА ПРОЩАНИЕ.

ЭТИ ОККУЛЬТНЫЕ
ШТУКОВИНЫ ЭКИ -
ПОХОЖЕ, ИХ СТАЛО
ЕЩЁ БОЛЬШЕ.



АХ!

ВЕДЬ ВСЁ ЭТО -
ПРОСТО ХЛАМ!



ХОРОШАЯ ЦАДЕЯ,
НЕ ТАК ЛИ?

ТОДОМ-ТОДОМ

САМОЕ ЛУЧШЕЕ
ДЛЯ ВЫПУСКНОЙ
ЦЕРЕМОНИИ!

ДА, НЕПЛОХО!
ДАВАЙ ПОПРОБУЕМ!

ЭПИЛОГ



ЭТО БУДУТ ПРОВОДЫ,
ДОСТОЙНЫЕ
ФИЗИЧЕСКОГО
КРУЖКА.

КАК
ХОРОШО.



И ВСЁ БЛАГОДАРЯ ТОМУ, ЧТО
ЭКИ-САН ЗАИНТЕРЕСОВАЛАСЬ
МЕХАНИКОЙ ТЕКУЩИХ СРЕД.

Я ПОИСТИНЕ
СЧАСТЛИВ.



ЭТО ВСЁ БЛАГОДАРЯ
ТЕБЕ, СИРАИСИ.

ТЫ ТОЛЬКО И ДЕЛАЛ,
ЧТО УЧИЛ МЕНЯ, ХОТЯ
Я И СТАРШЕ.

Да
ладно.



ПОЧЕМУ КОРАБЛИ НЕ ТОНУТ,
А САМОЛЁТЫ МОГУТ ЛЕТАТЬ... Я СЧИТАЛА
ЭТО САМО САМОЙ РАЗУМЕЮЩИМСЯ
И НИЧЕГО НЕ ЗНАЛА.

Я НИЧЕГО НЕ ЗНАЛА И О МНОЖЕСТВЕ
ДРУГИХ СКРЫТЫХ ПРИЧИН, СТОЯЩИХ
ЗА ОКРУЖАЮЩИМИ НАС ЯВЛЕНИЯМИ.

И ВО ВРЕМЯ УЧЁБЫ Я ОЧЕНЬ ЖАЛЕЛА,
ЧТО НИЧЕГО НЕ ЗНАЛА ПРО ЭТО
РАНЬШЕ.



ПОДЪЁМНАЯ СИЛА,
ЛОБОВОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ.
ЭТО ПОИСТИНЕ КАКИЕ-ТО
СВЕРХЪЕСТЕСТВЕННЫЕ
СИЛЫ.

И РАЗ УЖ Я ИХ ИЗУЧИЛА,
ТО ХОЧУ КАК СЛЕДУЕТ
ИСПОЛЬЗОВАТЬ!



И Я РЕШИЛА...

...ПОПРОБОВАТЬ
ПРЕВРАТИТЬ МЕХАНИКУ
ТЕКУЧИХ СРЕД
В ВОЛШЕБСТВО, ЧТОБЫ
УДИВИТЬ АКАНЭ
НА ПРОЩАНИЕ!

КСТАТИ...

ХЛОП



!!!
ЧТО ДЕЛАЕТ
ЭТА ЭКИ?

АКАНЭ!



Я ЗАДЕСЬ, ЗАДЕСЬ!

СМОТРИТЕ!



АХ, И ЧТО ОНА
ТАМ ДЕЛАЕТ?

И ЧТО У НЕЁ
В РУКЕ?

ЭТО - МОДЕЛЬ
САМОЛЁТА, КОТОРУЮ
МЫ ПОСТРОИЛИ
ВМЕСТЕ С ЭКИ-САН.



АКАНЭ, ЭТО ТЕБЕ НА ПАМЯТЬ
ОБ ОКОНЧАНИИ ШКОЛЫ! ЭТО ШОУ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДОРОГОЙ НАМ
МЕХАНИКИ ТЕКУЧИХ СРЕД!

ЧТОБЫ ТЫ, АКАНЭ,
В БУДУЩЕМ ТОЖЕ
КАК СЛЕДУЕТ ВСТАЛА
НА КРЫЛО!



НЕТ, ПОСТОЙ,
ЭТО ЕЩЕ НЕ ВСЁ!

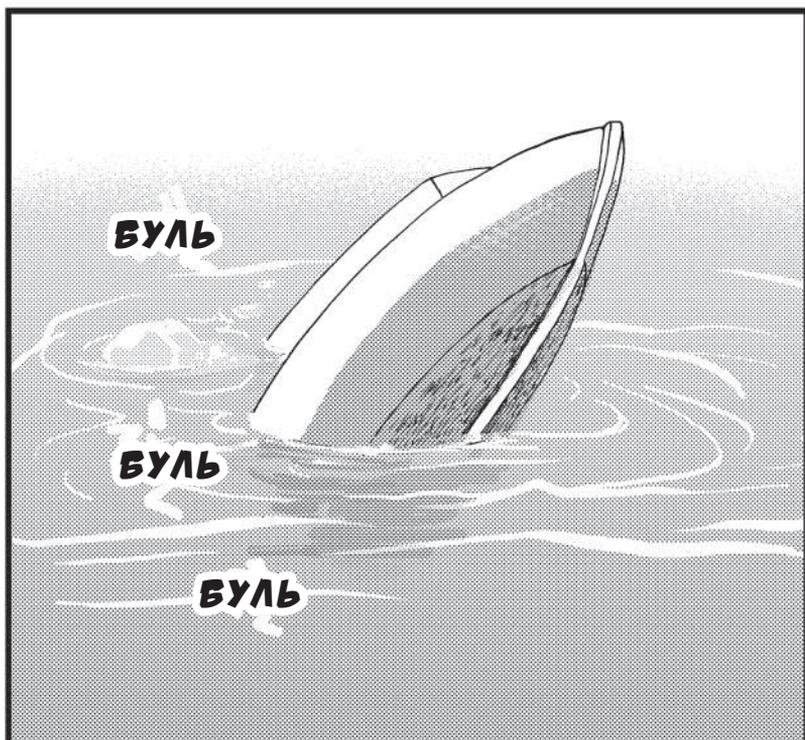
ЭКИ-САН!

АКАНЭ-САН!
ПОЙДЕМ СО МНОЙ!



У НАС ЕЩЕ КОРАБЛЬ
ЕСТЬ. ЦЕРЕМОНИЯ
СПУСКА НА ВОДУ!

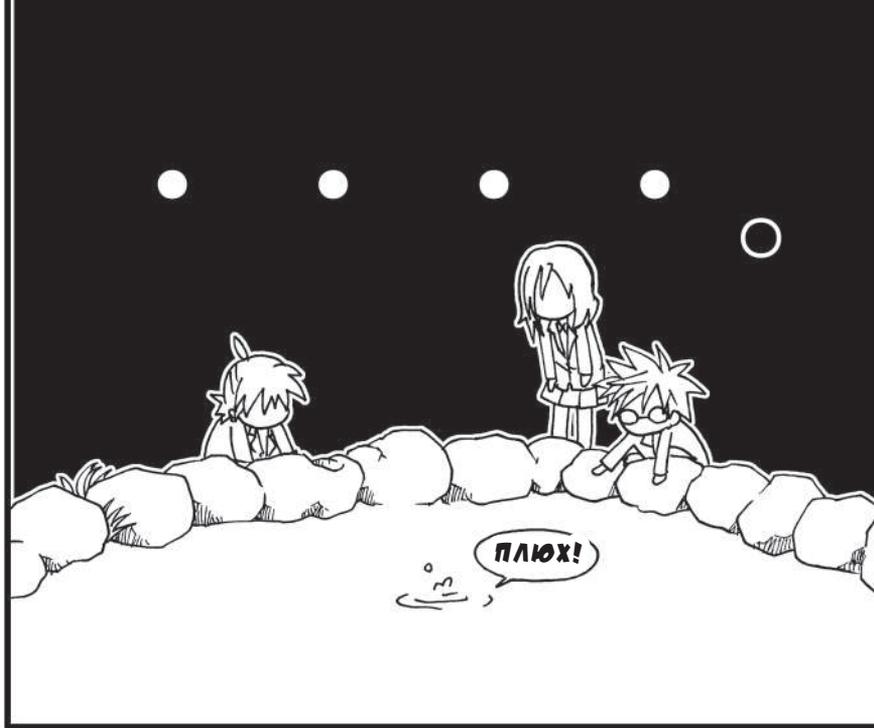
МЫ РЕШИЛИ
ПРИУРОЧИТЬ ЭТО
К ТВОЕМУ ВЫПУСКУ!



БУЛЬ

БУЛЬ

БУЛЬ



ПРОСТИТЕ МЕНЯ,
ПОЖАЛУЙСТА...

ПЛЮХ!



ПОХОЖЕ,
Я ДОПУСТИЛ ОШИБКУ
В ВЫЧИСЛЕНИЯХ
МЕХАНИКИ ТЕКУЩИХ
СРЕД.

Я, УЧИВШИЙ ВАС
С ТАКИМ АПЛОМЕОМ!
КАКОЮ ПОЗОР!

БАМ

НУ, ЕСЛИ ТАК,
ПРИШЛА ОЧЕРЕДЬ
ПОКАЗАТЬ
ОККУЛЬТНЫЕ
ШТУЧКИ!
НЕ ТАК ЛИ!

ШУРХ

* Игра слов, связанная с похожим звучанием слов «подъёмная сила», «сила плавучести» и «волшебство» (прим. перев.)



КОГДА НЕ ХВАТАЕТ ПОДЪЁМНОЙ СИЛЫ, ЕЁ МОЖНО ВОСПОЛНИТЬ СВЕРХЪЕСТЕСТВЕННОЙ*.

ДА, ВЫ И НАПОСЛЕДОК РЕШИЛИ ПОВЕСЕЛИТЬ МЕНЯ, МОИ МЛАДШИЕ ТОВАРИЩИ!

ЧТО БУДЕТ С МЛАДШИМИ, КОТОРЫЕ ПОСТУПАТ К ВАМ В КРУЖОК В СЛЕДУЮЩЕМ УЧЕБНОМ ГОДУ!

АХ!

ТЪФУ

ХХА

ХХА

ХХА

ХХА



ХА-ХА-ХА...

МОЖЕТ БЫТЬ, ВЕЩИЦЫ
СОН ЭКИ БЫЛ ИМЕННО
ОБ ЭТОМ.

УФУФ



Ах!

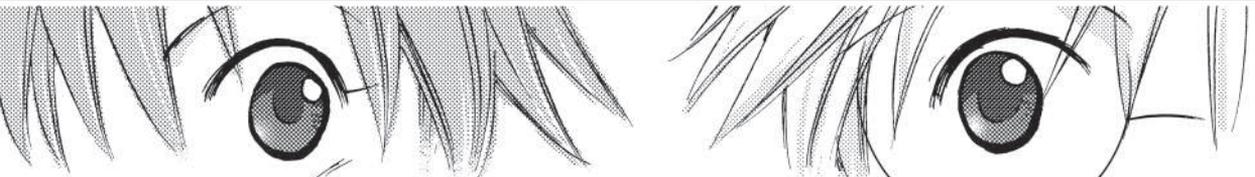
ЭТОТ ЕЁ СОН
ПРИВЁЛ НАС
К ИЗУЧЕНИЮ
МЕХАНИКИ ТЕКУЧИХ
СРЕД,...

...И БЛАГОДАРЯ ЕЙ
НАМ БУДЕТ О ЧЁМ
ВСПОМНИТЬ...



ЭКИ, СИРАИСИ...
МНЕ БЫЛО ОЧЕНЬ
ИНТЕРЕСНО С ВАМИ.

Я БЛАГОДАРНА
ВАМ ЗА ЭТО.



НЕТ, АКАНЭ.

У НАС ЕСТЬ ЕЩЁ
КОЕ-ЧТО
ДЛЯ ТЕБЯ!



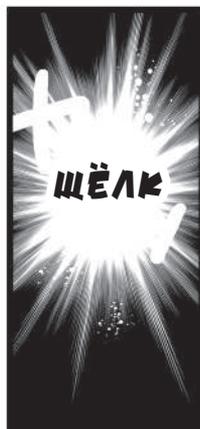
ВСПОМНИ ПРО ТО,
ЧТО МЫ ИЗУЧАЛИ
ТОГДА У МОРЯ!

В МЕХАНИКЕ ТЕКУЧИХ
СРЕД МЫ ИЗУЧАЛИ СИЛУ
ПЛАВУЧЕСТИ,
ПОДЪЁМНУЮ
СИЛУ, И, НАКОНЕЦ,...



...СИЛУ ЛЮБОВОГО
СОПРОТИВЛЕНИЯ!

!!!



ЭПИЛОГ

ПЛАВНО КРУЖАЩИЕСЯ
КОНФЕТТИ - МОЖЕТ БЫТЬ,
ЭТО ТОЖЕ МЕХАНИКА
ТЕКУЧИХ СРЕД?

ЕСЛИ ТАК, ТО У МЕНЯ
ЕСТЬ ХОРОШАЯ ЦЕДЕЯ!

ЭТО БЫЛО
ОЗАРЕНИЕ ЭКИ-САН
НА ОБРАТНОМ ПУТИ
ОТ МОРЯ.

Я УЗНАЛА, ЧТО ПРИНЦИП
КОНФЕТТИ ОСНОВАН
НА СОЧЕТАНИИ ЛЮБОВОГО
СОПРОТИВЛЕНИЯ
И ПОДЪЁМНОЙ СИЛЫ...

... И РЕШИЛА
УДИВИТЬ ТЕБЯ
НА ПРОЩАНИЕ
С ПОМОЩЬЮ МЕХА-
НИКИ ТЕКУЧИХ СРЕД.

Так...

Так...

Мм...



СЧИТАЕТСЯ, ЧТО
НА ПАДАЮЩИЕ КОНФЕТТИ
СЛОЖНЫМ ОБРАЗОМ ДЕЙСТВУЕТ
СОПРОТИВЛЕНИЕ ВОЗДУХА.
ПОЭТОМУ Я ИЗУЧАЛ СТАТЬИ
ПО АНАЛИЗУ ДВИЖЕНИЯ СВО-
БОДНО ПАДАЮЩИХ ЛИСТОВ
БУМАГИ И ЛИСТЬЕВ, МОДЕЛИ-
РОВАНИЮ ТАК НАЗЫВАЕМОЙ
"ПРОБЛЕМЫ ЛИСТА".

А Я В ЭТО ВРЕМЯ РЕЗАЛА
НОЖНИЦАМИ БУМАГУ.
Я ИССЛЕДОВАЛА, ПРИ КАКОЙ
ФОРМЕ ПОЛЁТ КОНФЕТТИ
БУДЕТ САМЫМ КРАСИВЫМ!

Я УСТАНОВИЛА, ЧТО
ТРЕУГОЛЬНИКИ ЛУЧШЕ, ЧЕМ
КВАДРАТЫ! А ТЫ ПРО ЭТО
ЗНАЛА, АКАНЭ?!

Я ГОВОРИЛ РАНЬШЕ, ЧТО
СОПРОТИВЛЕНИЕ ВОЗДУХА
СЧИТАЕТСЯ ПОМЕХОЙ,...

...НО БЛАГОДАРЯ ЕМУ
КОНФЕТТИ ТАК КРАСИВО
ТАНЦУЮТ, ПЕРЕВОРАЧИВАЯСЬ
В ПОЛЁТЕ!

ПОЭТОМУ Я ХОЧУ
СКАЗАТЬ ТЕБЕ, АКАНЭ!
ДАЖЕ ЕСЛИ ТЫ
В ДАЛЬНЕЙШЕЙ ЖИЗНИ
ВСТРЕТИШЬСЯ
С ПРОБЛЕМАМИ, НЕ БОЙСЯ,
А ИСПОЛЬЗУЙ ИХ, ЧТОБЫ
СВЕРКАТЬ ТАК ЖЕ,
КАК ЭТИ КОНФЕТТИ!

Я ВЕРЮ, ЧТО ОНА
ВСЁ ПОНЯЛА!



ДА Я И БЕЗ ВАС
ЭТО ЗНАЮ.

ТОЖЕ МНЕ,
УМНИКИ НАШЛИСЬ!



А-а!



ДОРОГАЯ АКАНЭ, ОТ ВСЕЇ
ДУШИ ПОЗДРАВЛЯЮ ТЕБЯ
С ОКОНЧАНИЕМ ШКОЛЫ!



ЧТО?



КОГДА Я ТОЛЬКО ЧТО
ФОТОГРАФИРОВАЛА "ПОЛАРОИДОМ",
ЗА СПИНОЙ У АКАНЭ НИКОГО НЕ БЫЛО?

!!!!!!?

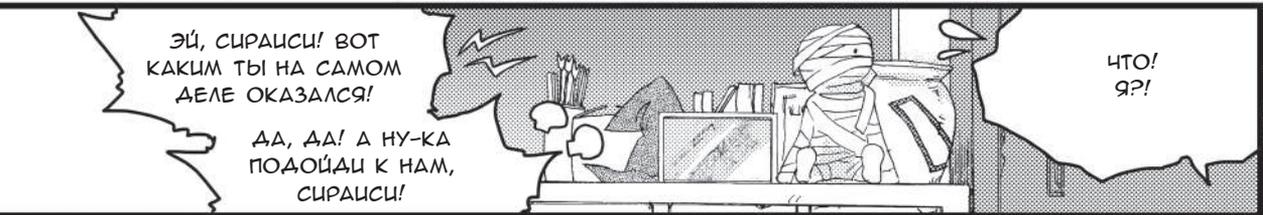


А-А-А!
ЗДОРОВО! КЛАССНО!
СПИРИТИЧЕСКОЕ ФОТО?!

ЭТО БЫЛО ВСЕГО ЛИШЬ
ОТРАЖЕНИЕМ ОДНОЙ ИЗ
ОККУЛЬТНЫХ ШТУКОВЫН
ЭКИ-САН В ОКОННОМ
СТЕКЛЕ.

Ах, вот
оно что.

НЕТ, НЕ МОЖЕТ БЫТЬ!



ЭЙ, СИРАИСИ! ВОТ
КАКИМ ТЫ НА САМОМ
ДЕЛЕ ОКАЗАЛСЯ!

ДА, ДА! А НУ-КА
ПОДООЙДИ К НАМ,
СИРАИСИ!

ЧТО!
Я?!



ЭТО ВСЁ ТЫ, ЭКИ!
ТЫ ВООБЩЕ
ХОТЯ БЫ РАЗ ТАМ
УБИРАЛАСЬ?

НУ, КАК
СКАЗАТЬ...

АХ, АКАНЭ,
ПРОСТИ!

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

В серии «Образовательная манга» вышли следующие книги:

- 📖 Син Такахаси. «Занимательная статистика» М.: Додэка. 2010, 224 с.
- 📖 Син Такахаси, Иноуэ Ироха. «Занимательная статистика. Регрессионный анализ» М.: ДМК Пресс, 2015, 240 с.
- 📖 Син Такахаси, Иноуэ Ироха. «Занимательная статистика. Факторный анализ» М.: ДМК Пресс, 2015, 256 с.
- 📖 Мана Такахаси, Сёко Адзума. «Занимательное программирование. Базы данных» М.: ДМК Пресс, 2015, 240 с.
- 📖 Хироюки Кодзима, Син Тогами. «Занимательная математика. Производные и интегралы» М.: ДМК Пресс, 2015, 240 с.
- 📖 Митио Сибуя, Хироки Харусэ. «Занимательная математика. Анализ Фурье» М.: ДМК Пресс, 2014, 256 с.
- 📖 Хидео Нитта, Кейта Такацу «Занимательная физика. Механика.» М.: ДМК Пресс, 2014, 240 с.
- 📖 Казухиро Фудзитаки, Мацуда «Занимательная физика. Электричество» М.: ДМК Пресс, 2014, 224 с.
- 📖 Киёси Кавабата, Кэндзи Исикава, Ютака Хиираги. «Занимательная астрономия. Вселенная» М.: ДМК Пресс. 2015, 256 с.
- 📖 Харада Томо хиро, Кавамо то Риэ. «Занимательная физика. Термодинамика» М.: ДМК Пресс, 2015, 208 с.

Интернет-сайты

Дайвинг на Окинаве

http://www.benthos.info/net_diving_school/program/skin/p09.htm

Изучаем текущие среды!

<http://www.robo-dispenser.com/compass/compass01.html>

Принципы полёта

<http://www.ops.dti.ne.jp/~gotha/Aircraft/study1.html>

ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

А

- Абсолютное давление — 22
- Атмосферное давление — 17

В

- Векторная величина — 21, 36
- Визуализация течения — 54
- Внешняя сила — 60
- Вязкая текучая среда — 104, 118
- Вязкостное напряжение — 109
- Вязкость — 65, 98, 174

Г

- Газы — 14
- Гидравлический домкрат — 30
- Гнутые трубы — 137
- Градиент давления — 120
- Градиент скорости — 107, 175

Д

- Давление — 18
- Давление 1 атмосфера — 17, 22
- Давление 2 атмосферы — 17
- Давление p — 19
- Дельта Δ — 33, 35
- Динамическое давление — 156

Е

- Единицы измерения давления — 22

Ж

- Жидкостный манометр — 34, 37
- Жидкость — 13, 14

З

- Закон вязкости Ньютона — 106, 109
- Закон Паскаля — 29
- Закон сохранения импульса — 80
- Закон сохранения импульса для твёрдых тел — 80
- Закон сохранения импульса для текучей среды — 90
- Закон сохранения импульса текучей среды — 86

- Закон сохранения массы — 66
- Закон сохранения массы текучей среды — 66, 67
- Закон сохранения энергии для твёрдых тел — 71
- Закон сохранения энергии текучей среды — 72, 164

И

- Идеально текучая среда — 104, 118
- Избыточное давление — 22
- Изогнутая труба — 137
- Импульс — 82
- Импульс силы — 84

К

- Кинетическая энергия текучей среды — 156
- Классическая механика — 15, 60
- Коэффициент вязкости — 110
- Коэффициент кинематической вязкости — 110
- Коэффициент лобового сопротивления — 157, 161
- Коэффициент подъёмной силы — 157, 161
- Коэффициент потерь — 134
- Коэффициент трения в трубе — 130
- Кривизна — 146
- Критическое число Рейнольдса — 115

Л

- Ламинарное течение — 95, 113, 114, 117
- Ламинарный пограничный слой — 176
- Линии тока — 58, 164, 170
- Лобовое сопротивление — 139, 143, 144, 155

М

- Масса — 55
- Математическое определение силы — 20
- Метод Лагранжа — 56
- Метод Эйлера — 56
- Механика текучих сред — 60

Н

- Напряжение разности давлений — 125
- Неоднородное течение — 54
- Нестационарное течение — 52

О

- Область проверки — 86
- Объём — 55
- Однородное течение — 54
- Опыт Рейнольдса — 115
- Основные уравнения течения — 49
- Относительная плотность — 26
- Отрыв — 162, 174
- Отрыв пограничного слоя — 176

П

- Плотность — 25, 26, 55, 73
- Плотность воздуха — 27
- Площадь фронтальной проекции — 158
- Пограничный слой — 174
- Подъёмная сила — 139, 143, 144, 146, 152, 170
- Полное давление P — 19, 40, 41
- Потери давления — 116, 134
- Потери на входе — 135
- Потери на трение — 128
- Потери на трение в трубе — 130

Р

- Разность давлений — 33, 122
- Распределение скоростей текучей среды — 117
- Расход текучей среды — 55, 68, 126
- Расширенное уравнение Бернулли — 129
- Резко расширяющаяся труба — 135
- Резко сужающаяся труба — 136
- Рейнольдса число — 111

С

- Сдвигающая сила — 63
- Сила вязкости — 65, 99, 100, 106, 111, 175
- Сила инерции — 111
- Сила плавучести — 43, 144
- Сила трения — 60
- Сила тяжести — 60

- Силы текучей среды — 155
- Скалярная величина — 21
- Скорость — 36, 55
- Скорость текучей среды — 55, 118
- Сопротивление — 177
- Средняя скорость текучей среды — 117, 119
- Статика — 11
- Стационарное течение — 52

Т

- Твёрдые тела — 12, 13, 14
- Текучие среды — 12, 13, 15
- Теорема Бернулли — 71, 74, 164, 170
- Теорема о кривизне линий тока — 149, 150
- Течение Пуазейля — 121
- Точка отрыва — 176
- Траектории тока — 58
- Трубки тока — 58
- Турбулентное течение — 95, 113, 114, 116, 173
- Турбулентный пограничный слой — 176

У

- Угол атаки — 161
- Уменьшение сопротивления воздуха — 172
- Уравнение Бернулли — 74
- Уравнение движения — 20, 23
- Уравнение движения Эйлера — 74
- Уравнение непрерывности — 67, 69, 70, 118
- Уравнение равновесия — 23
- Ускорение — 20, 36
- Ускорение свободного падения — 20

Ф

- Формула Дарси-Вейсбаха — 131

Х

- Характерная скорость — 112
- Характерный размер — 112

Э

- Энергия — 75, 128
- Энергия давления — 77
- Эффект Магнуса — 163, 171

ОБ АВТОРЕ

Такэи Масахиро в 1995 году окончил докторантуру в области научно-технических исследований в аспирантуре университета Васэда. Доктор технических наук. В настоящее время – профессор Кафедры машиностроения Инженерного факультета университета Нихон.



Книги издательства «ДМК Пресс» можно заказать в торгово-издательском холдинге «Планета Альянс» наложенным платежом, выслав открытку или письмо по почтовому адресу: 115487, г. Москва, 2-й Нагатинский пр-д, д. 6А

При оформлении заказа следует указать адрес (полностью), по которому должны быть высланы книги; фамилию, имя и отчество получателя.

Желательно также указать свой телефон и электронный адрес.

Эти книги вы можете заказать и в интернет-магазине: www.aliants-kniga.ru.

Оптовые закупки: тел. (499) 782-38-89

Электронный адрес: books@aliants-kniga.ru.

Такэи Масахиро (автор), Мацусита Маи (художник)

Занимательная физика. Гидродинамика. Манга

Издательство выражает благодарность В. О. Панфилову

Главный редактор Д. А. Мовчан

dmkpress@gmail.com

Перевод с японского А. Б. Клионский

Научный редактор Г. Е. Фалькович

Верстальщик А. Ю. Анненков

Корректор Г. И. Синяева

Формат 70×100/16. Бумага офсетная.

Печать офсетная. Объём 13 п. л. Усл. п. л. 19,5. Тираж 1000 экз.

Веб-сайт издательства ДМК Пресс: www.dmkpress.com