

АЛЬБОМ ТЕЧЕНИЙ ЖИДКОСТИ И ГАЗА

М.: Мир, 1986, 184 стр.

Книга представляет собой собрание фотографий разнообразных течений жидкости и газа, иллюстрирующих закономерности потоков в различных условиях. Представлены результаты экспериментальных исследований специалистов из США, Англии, Франции, Японии и других стран. Классификация, обработка и комментирование этого материала выполнены известным американским ученым.

Для математиков-вычислителей, механиков, физиков, инженеров, аспирантов и студентов вузов.

Предисловие редакторов перевода	6
Введение	8
Гл. 1. Ползущее течение	10
Гл. 2. Ламинарное течение	20
Гл. 3. Отрыв течения	26
Гл. 4. Вихри	44
Гл. 5. Неустойчивость	62
Гл. 6. Турбулентность	90
Гл. 7. Течение со свободной поверхностью	106
Гл. 8. Свободная конвекция	120
Гл. 9. Дозвуковое течение	130
Гл. 10. Ударные волны	138
Гл. 11. Сверхзвуковое течение	156
Литература	175
Литература по гидродинамике, выпущенная издательством «Мир»	177
Предметный указатель	179

Предметный указатель

Бейсбольный мяч 66	- при истечении из сопла 76
Блазиуса пограничный слой 29	Вихревое кольцо в круглой струе
- профиль 30	102, 117, 120
- цилиндр, нормальный ему 92, 93	- за шаром 49, 54
Бора 199, 200	- образующееся на цилиндре,
Винт 75	внезапно приведенном во
Вихревая дорожка за круговым	вращение 121
цилиндром 4, 94, 98, 221	- образующееся у отверстия в
- за телом под углом атаки 88, 89	пластинке 271
Вихревая пелена за внезапно	- структура 77
приведенным в движение	- формирование 76
клином 80	- чехарда таких колец 79
- за внезапно приведенной в	- ядро 78
движение пластинкой 63	Вихрей разрушение 124—126
- за прямоугольным крылом 84, 86	Вихри 75, 101

- внутри клина 10
- в пограничном слое 99, 100
- в ползущем течении 10, 20
- вторичные 61, 76, 92, 93
- за вращающимся винтом 75
- за круговым цилиндром 40, 46, 94, 98
- за плоской пластинкой 64, 65
- за телом вращения под углом атаки 87, 89
- над треугольным крылом под углом атаки 90, 91
- перед цилиндром в пограничном слое 92, 93, 165
- развитие на ускоренно движущейся пластинке 81
- сбегаящие с крыла 84, 86, 255
- спаривание их 178
- спиральные 132, 135
- Тейлора 127, 129, 131
- Вихрь в сливе ванны 101
- образующийся в начале движения 80, 81
- Внезапное начало движения кругового цилиндра 59, 61
- плоской пластинки 63, 65
- решетки цилиндров 60
- Водяная струя 178, 181
- Волны бегущие 191
- - за кораблем 201
- инерционные, на вихре в сливе ванны 101
- капиллярные 196, 197
- на вихревом кольце 114
- поверхностные, на воде 191, 197, 199, 201
- разрушение 192, 194
- стоячие 191
- Вторичное присоединение пограничного слоя 33, 35, 36
- течение 31
- Вторичные вихри 61, 76, 92, 93
- Выступ обтекаемый ползущим течением 11
- в течении в лотке Хил-Шоу 5
- с турбулентным отрывом 39
- Гидравлическая аналогия 229
- Диск, вращающийся 132
- Дифракция ударной волны 239
- Диффузор, отрывное течение в нем 175
- Дозвуковое течение, 219, 224
- Дуга полукруга в ползущем течении 13
- Дымовое кольцо -см. Вихревое кольцо 102
- Захват жидкости струей 169, 171
- Изотропная турбулентность 154, 155
- Каверна, обтекание ползущим потоком 14
- Кавитация в сопле 190
- пузырь у свободной поверхности 187
- Капиллярная неустойчивость жидкой струи 122, 123
- Капиллярные волны 196, 197
- Кармана вихревая дорожка за круговым цилиндром 4, 94, 98, 221
- за телом под углом атаки 88, 89
- Клин внезапное начало движения 80, 82
- дифракция ударной волны около него 240, 241
- отражение ударной волны от него 235, 238
- ползущее течение внутри его 10
- сверхзвуковое обтекание 228, 231, 233, 234, 256
- Когерентные структуры в слое смешения 176, 178
- Колблющийся цилиндр 31
- Конвективный факел 205, 215, 218
- Конвекция между цилиндрами 208, 209
- от вертикальной пластинки 204, 205, 213, 214
- от кругового цилиндра 202, 206, 211

- от нагретой горизонтальной проволоки 203
- под горизонтальной пластинкой 210
- Конус вращающийся 134
- в сверхзвуковом потоке 257, 259, 261, 274
- под углом атаки 73
- Концевые вихри, сбегаящие с крыла 84, 86, 255
- - неустойчивость 116
- Корабельные волны 201
- Косая ударная волна
- образование 227
- при обтекании клина 228, 231, 233
- Кроу неустойчивость 116
- Круглое отверстие, сверхзвуковое истечение через него 277
- Круговой цилиндр вблизи пластинки 17
- вихревая дорожка Кармана за ним 4, 94, 98, 221
- вихри Тейлора между такими цилиндрами 127, 128, 131
- внезапно приводимый во вращение 121
- в отрывном ламинарном потоке 40, 46
- в ползущем течении 6
- в течении в лотке Хил-Шоу 1
- колеблющийся 31
- нормальный к пограничному слою 92, 93, 165
- решетка цилиндров, внезапно начинающая движение 59, 62
- обтекаемый ламинарным потоком 24
- при большом числе Рейнольдса 47, 48
- обтекание пары таких цилиндров в тандеме 15
- расположенных рядом 16
- при внезапном начале движения 61, 62
- спиралевидная турбулентность между такими цилиндрами 130
- Крыловые вихри 84, 86, 90, 91, 255
- Ламинарное течение 21, 74
- Маховское отражение нерегулярное 238
- обыкновенное 236, 237
- Неустойчивость 102, 150
- Бенара 141
- вихревого кольца 112, 115
- вихрей над треугольным крылом 125, 126
- водяной струи 179, 181
- закрученного течения в трубе 124
- капель в потоке 148
- капиллярная, жидкой струи 122, 123
- Кельвина-Гельмгольца 145, 147
- круглой струи 102, 117, 120
- кругового течения Куэтта 127, 128, 130, 131
- пары концевых вихрей 116
- пограничного слоя на пластинке 104, 106, 109, 111
- на цилиндре, внезапно приведенном во вращение 121
- под воздействием плавучести 139, 140
- при наложении потоков 146
- Рэлея-Бенара 139
- свободной конвекции 214, 215
- стратифицированного сдвигового течения 145
- струйки дыма от сигареты 107
- течения между вращающимися сферами 129
- на вогнутой стенке 144
- на вращающемся теле 132, 135, 150
- Пуазейля 103
- Толлмина-Шлихтинга 144
- тонкой жирной пелены 147, 149
- Обрушивание волны на воде 192, 194
- Отошедшая головная ударная волна 7, 234, 254, 256, 258, 262, 273
- Отрыв 32, 74

- в диффузоре 175
- ламинарные 24, 27, 69, 71
- на конусе под углом атаки 73
- на круговом цилиндре 15, 17, 40, 48, 59, 62, 221, 222
- на крыловом профиле под углом атаки 72
- на оживальном теле Рэнкина 74
- на шаре 19, 20, 49, 58, 66, 220, 266
- на эллипсе 32
- перед ступенькой 69
- при малых числах Рейнольдса 10, 20
- у передней кромки 33, 35, 36
- Переход к турбулентности в вихревом кольце 111
- вниз по потоку от волн Толлмина-Шлихтинга 106
- в пограничном слое на шаре 55, 57, 58
- в трубе 103
- за телом вращения 70, 71
- на пластинке 104, 105
- Пластинка в ламинарном потоке 29, 30
- внезапно начинающая движение 63, 65
- в ползущем течении 7
- в течении в лотке Хил-Шоу 3
- ламинарный отрыв на ней 35, 37
- неустойчивость пограничного слоя на ней 104—106
- турбулентное пятно при обтекании 109, 111
- ускоренно движущаяся 81
- Поверхностные волны 191, 197, 199, 201
- Пограничный слой ламинарный и турбулентный 156
- на плоской пластинке 29, 30
- турбулентный 156, 165
- цилиндр, нормальный к нему 92, 93, 165

- Подковообразные вихри перед цилиндром в пограничном слое 92
- при отсосе через отверстия в пограничном слое 99, 100
- Подслой турбулентного пограничного слоя 159, 160
- Ползущее течение 1, 20
- Потенциальное течение 1, 5
- Профиль крыла в дозвуковом потоке 219
- в ламинарном потоке 23
- в сверхзвуковом потоке с запиранием 230
- в течении в лотке Хил-Шоу 4
- под углом атаки, при наличии отрыва 34, 72
- с затупленной задней кромкой 67, 68
- Прямая ударная волна 225
- образование 226
- Прямоугольное крыло 84, 86
- Пуазейля течение, неустойчивость 103
- Пузырь коллапс 188
- поднимающийся в жидкости 182, 186
- при кавитации 187
- Пуля 7, 254
- Рейнольдса эксперимент с краской 103
- Релаксационное расширение фронта ударной волны 233
- Решетка круговых цилиндров, импульсивное обтекание 60
- свободная конвекция от нее 211
- Решетка, турбулизация с ее помощью 152, 155
- Рэнкина оживальное тело 22, 74
- Рэнкина полутело 2
- Свертывание вихревой пелены 80, 86
- Сверхзвуковое течение 252, 279
- в струе 168

- при обтекании клина 228, 231, 233, 234, 256
- при обтекании конуса 257, 259, 261, 274
- при обтекании модели самолета 255
- при обтекании пули 7, 254
- при обтекании снаряда 253
- при обтекании тела со степенным контуром 273
- при обтекании тела с плоской передней частью 262, 265, 282
- Свободная конвекция 202, 218
- поверхность, течение с ней 179, 201
- След за кораблем 201
- за круговым цилиндром 4, 59, 62, 94, 98, 221, 222
- за профилем с плоской задней кромкой 67, 68
- за танкером, севшим на мель 173
- за телом вращения с плоским дном 71, 223, 224, 253, 265
- за тонким телом 21
- за шаром 49, 58, 266, 269, 271
- пузыря 184, 186
- турбулентный 151, 172, 174
- Слив ванны (вихрь в нем) 101
- Смещения слой 176, 178
- Сопло, кавитация в нем 190
- процесс запуска для него 278
- распыление при истечении из него 198
- сверхзвуковое, при наличии возмущений от стенок 279
- Спаривание вихрей 178
- Спиральные вихри 132, 135
- Стокса течение 1, 20
- Струя водяная 179, 181
- капиллярная неустойчивость 122
- неустойчивость 102, 117, 120
- сверхзвуковая 275, 276
- турбулентная 166, 171
- Ступенька, обтекание 69, 70
- Тейлора вихри 127, 129, 131

- Тело вращения в дозвуковом потоке 223, 224
- вихри за ним (тело под углом атаки) 87, 88, 89
- в ламинарном потоке с отрывом 33
- в сверхзвуковом потоке 253, 260, 261
- ламинарный след за ним 21
- Термики, порождаемые нагретой поверхностью 108
- Толлина-Шлихтинга волны 106, 135
- Трансзвуковое «замораживание» 253
- Трансзвуковое течение 219, 224, 250, 253, 255
- Треугольное крыло, вихри над ним 90, 91
- разрушение вихрей над ним 125, 126
- Турбулентное пятно 109, 111
- Турбулентное течение 151, 178
- в пограничном слое 156, 165
- в следе 151
- в слое смешения 176, 188
- в струе 166, 171, 275, 276
- в трубе 103
- за круговым цилиндром 47, 48, 221, 222
- за прямоугольным выступом 39
- за решеткой 152, 155
- за телом вращения 70, 71, 223, 224, 253, 254, 261
- за шаром 55, 58, 220, 266, 269
- на искривленной стенке 38
- Ударные волны 225, 251
- взаимодействие с пограничным слоем 248, 251
- дифракция 239, 242
- на клине 228, 229, 231, 234, 256
- на конусе 257, 259, 261, 274
- на поверхности снаряда при дозвуковой скорости 223, 224
- на профиле с плоской задней кромкой 67

- на теле вращения под углом атаки 89
- образование 226, 227
- отошедшие 234, 254, 256, 258, 262, 273
- попадающие на клин 82, 83
- прямые 225, 226
- фокусировка 244

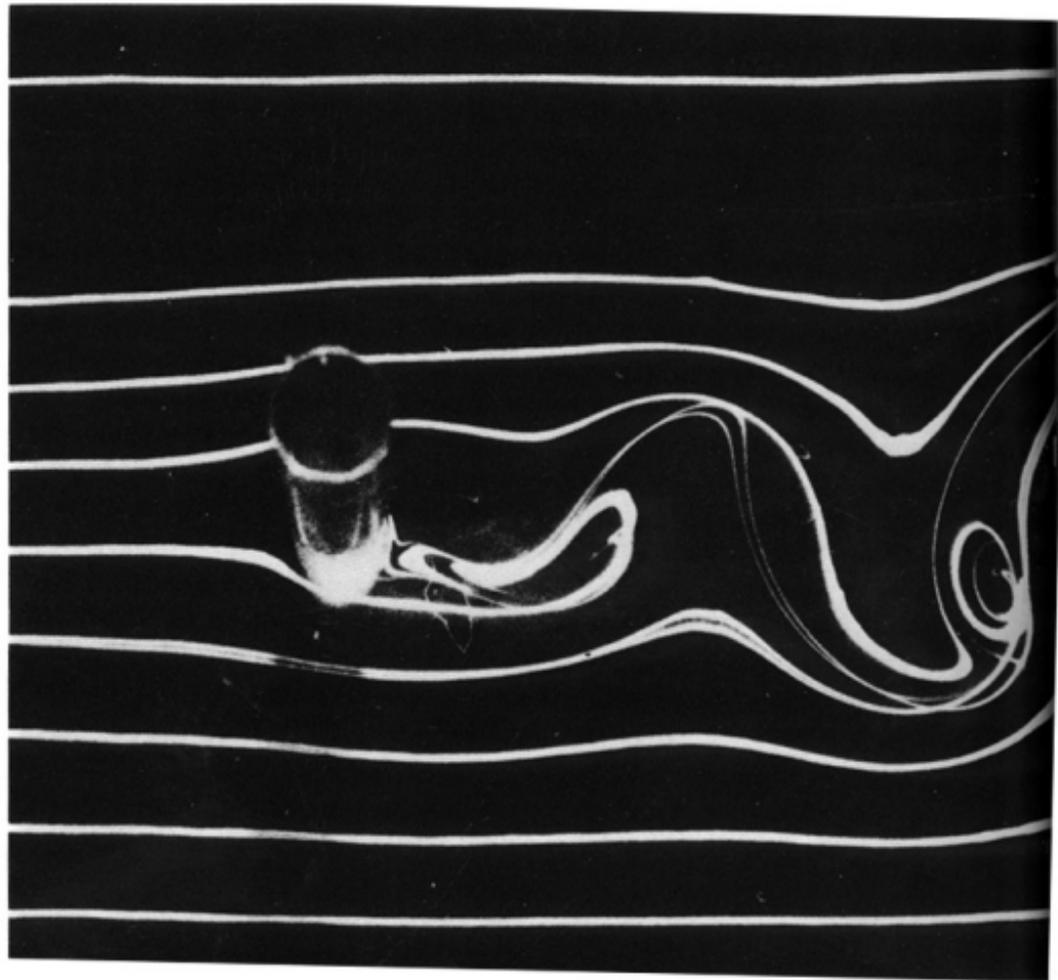
Уиднелла неустойчивость 113
Факел конвективный 203, 215, 218
Фокусировка ударной волны 244
Хил-Шоу течение 1, 5
Чехарда вихревых колец 79

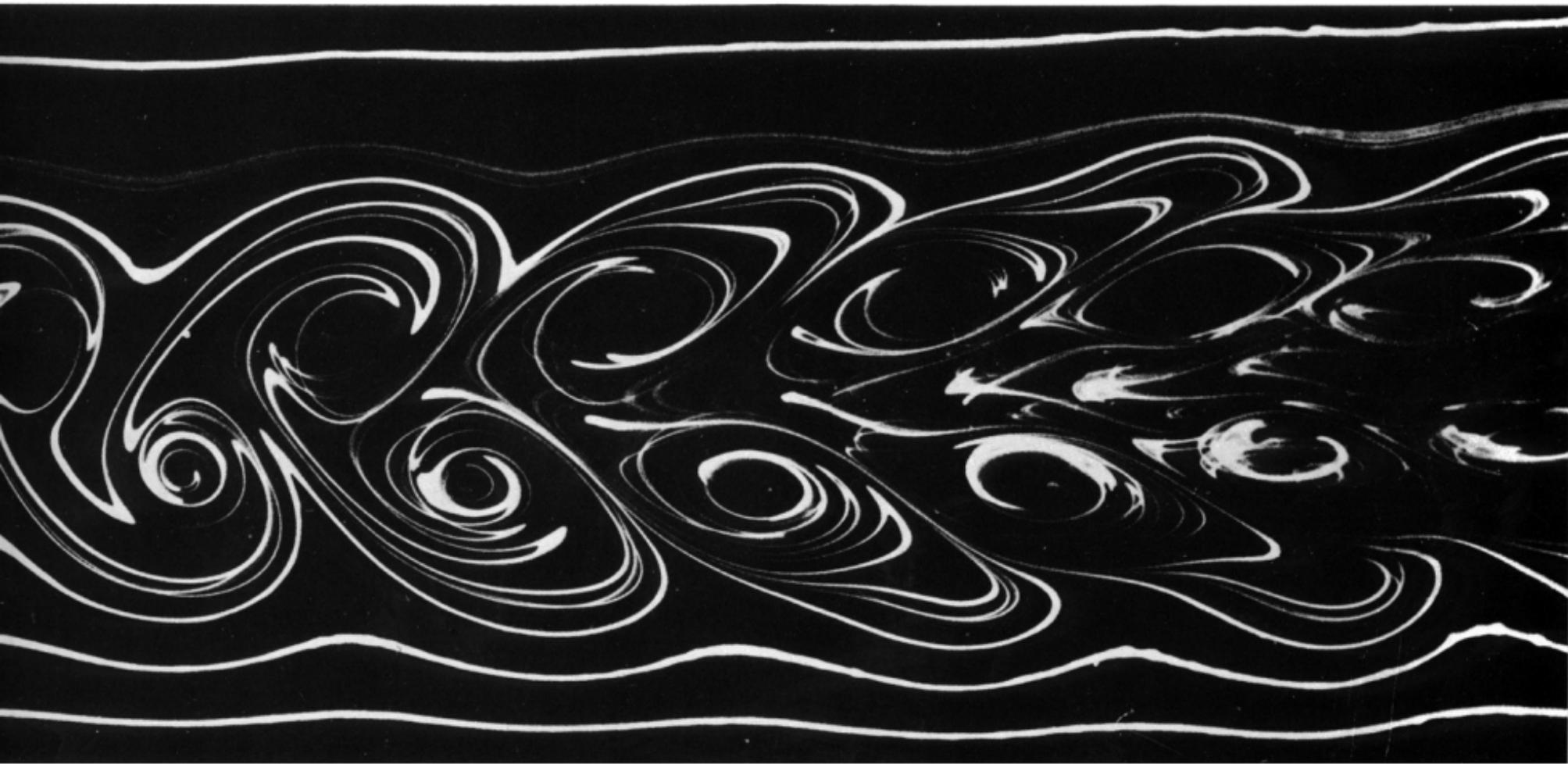
Шар в дозвуковом потоке 220

- вихри Тейлора 129
- в ламинарном потоке 26, 28
- в ламинарном потоке с отрывом 49, 54
- вращающийся 133
- в сверхзвуковом потоке 266, 271
- движущийся в трубе 8, 9, 28, 51
- обтекание при большом числе Рейнольдса 55, 58

Эллипс, ламинарный отрыв на нем 32
Эммонса турбулентное пятно 109, 110, 111

Вихревая дорожка Кармана за круговым цилиндром. Струйки дыма в аэродинамической трубе демонстрируют периодическое сбегание вихрей. Число Рейнольдса составляет примерно 300; это значение близко к наблюдаемому верхнему пределу устойчивости; в соответствии с этим у расположенного вниз по потоку края снимка наблюдается, по видимому, распад картины течения. Данная конфигурация представляет собой промежуточную стадию в замечательном многообразии картин течения, последовательно сменяющих друг друга по мере увеличения числа Рейнольдса. Представленной на фото стадии предшествуют симметричное течение Стокса, показанное на фото 6, и конфигурации с симметричными неподвижными вихрями, изображенные на фото 40–46. При более высоких числах Рейнольдса эта стадия сменяется картинками турбулентного следа, представленными на фото 47 и 48. Фото Peter Bradshaw





Предисловие редакторов перевода

Представляемая советскому читателю книга уникальна – можно с уверенностью сказать, что за двести пятьдесят лет существования гидродинамики такой книги не было. В ней собраны фотографии разных гидродинамических явлений. Эти явления имеют различную степень известности и осмысления: от фотографий волн на поверхности воды, иллюстрирующих эффекты, хорошо изученные в классической гидродинамике, до подъема пузырьков в неньютоновской жидкости, где возникает характерное заострение на задней кромке. Теории этого последнего явления еще нет, как нет даже качественных теорий многих явлений, представленных на фотографиях в этой книге.

Мы видим много путей использования книги. Это прежде всего преподавание. Наш собственный опыт показал, что при чтении курсов и ведении семинаров использование приведенных в альбоме фотографий существенно поднимает уровень понимания слушателями важнейших моментов гидродинамических теорий. Что еще более важно, разглядывание этих фотографий способствует формированию у слушателей гидродинамической интуиции.

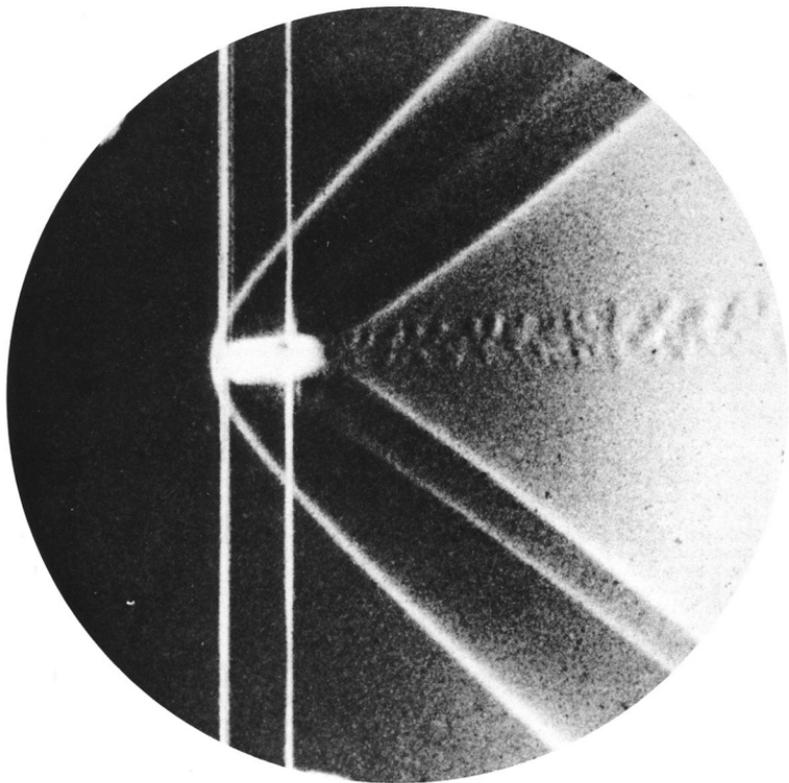
Далее, внимательное изучение фотографий зрелыми исследователями тоже очень полезно. Опыт показывает, что эти фотографии заставляют задуматься над важными вещами, детальное ис-

следование которых часто не проводилось. Например, грибовидные структуры на внешней границе пограничного слоя: они многое могут прояснить в структуре этого слоя, и неслучайным было обращение к их количественному исследованию в недавних экспериментах С. И. Воропаева и И. А. Филиппова (Изв. АН СССР, сер. Физика атмосферы и океана, 1985, т. 20, № 7). А. И. Гинзбург и К. Н. Федоров (Докл. АН СССР, 1984, т. 276, № 2) обнаружили грибовидные структуры на космических фотографиях поверхности океана.

После выхода предлагаемой книги всем стало ясно: фотографии гидродинамических явлений надо собирать вместе и размышлять над ними в совокупности, количество при этом переходит в качество. Можно быть уверенным, что этот призыв автора, профессора Станфордского университета Милтона Ван-Дайка, хорошо известного советскому читателю своими замечательными трудами в различных областях гидроаэродинамики и своим вкладом в метод сращиваемых асимптотических разложений, будет реализован многими советскими исследователями, столь плодотворно работающими в гидродинамике.

Редакторы глубоко благодарят проф. Милтона Ван-Дайка за любезное содействие, которое сделало возможным появление русского варианта его замечательной работы.

*Г. И. Баренблатт
В. П. Шидловский*



Латунная пуля, летящая со сверхзвуковой скоростью в воздухе. Эта фотография, полученная визуализацией шлирен-методом, была сделана Эрнстом Махом в Праге зимой 1888 г. Приводимый здесь снимок сделан путем примерно тридцатикратного увеличения с негатива размером менее 5 мм в диаметре (белые вертикальные линии соответствуют элементам проволочного крепления). Годом раньше Мах опубликовал первые из когда-либо сделанных фотографий подобного рода, изображающие отошедшую головную ударную

волну. Пять лет спустя он выполнил количественные измерения интенсивности ударной волны, применяя при этом прибор, разработанный его сыном Людвигом, врачом по профессии; теперь этот прибор известен под названием интерферометра Маха-Цендера. На стр. 1 показана пуля, летящая со сверхзвуковой скоростью и сфотографированная с применением этой техники в 1893 г. Фотография из архивов Института им. Эрнста Маха, Фрайбург, ФРГ, любезно предоставлена А. Stulp

Введение

Для нас, занимающихся исследованиями по гидромеханике, как и для некоторых из наших коллег, работающих в таких, например, областях, как оптика, весьма счастливой привилегией является возможность визуализации предмета наших исследований. Уже с давних времен визуализация течений играла важную роль в исследовательской работе и всегда давала возможность обрести качественное понимание явлений, а в последнее время позволяет получить количественные результаты. В литературе нынешнего века по гидромеханике разбросана настоящая сокровищница прекрасных и поучительных фотографий, представляющих собой ценный материал как для новых исследований, так и для учебных целей. В каждом из большинства учебников по гидромеханике содержится по крайней мере несколько таких фотографий.

Начиная с 1958 г., когда я обнаружил великолепный французский «Атлас оптических явлений» (Atlas de Phénomènes Optiques), я мечтал о том, чтобы когда-нибудь составить подобное собрание фотографий гидродинамических явлений. Однако, чтобы такое собрание отвечало своему назначению, оно должно быть достаточно дешевым и легкодоступным для студентов. Лишь недавно, когда я сам осуществил переиздание моей собственной книги по методам возмущений, достижение этих двух тесно связанных между собой целей показалось мне осуществимым. Разумеется, настоящее собрание не предназначено для того, чтобы заменить собой учебник; однако я надеюсь, что и преподаватели, и студенты найдут его полезным дополнением к учебнику.

Коллеги во всем мире щедро откликнулись на мою просьбу прислать отпечатки их лучших фотографий. Я просил о присылке одного такого комплекта, которым его владелец мог бы пожертвовать; к сожалению, некоторые из классических фотографий оказались утерянными. В частности, я не сумел отыскать оригиналов великолепных фотографий, которые использовал Прандтль, иллюстрируя свои статьи и книги. Однако для большинства этих фотографий я нашел их современные эквиваленты. В настоящем собрании фигурируют лишь черно-белые фотографии. Несмотря на то что мне было предложено несколько весьма впечатляющих цветных снимков, их включение в Альбом — по крайней мере в это первое издание — помещало бы установленной той умеренной цене Альбома, к которой я стремился. К счастью, огромное большинство прекрасных и информативных фотографий течений жидкости и газа оказалось черно-белым.

Как это и подсказывается самим названием «Альбом», собрание носит скорее личный и даже несколько случайный характер. В любом случае предмет гидромеханики нельзя упорядочить путем

какого-то линейного расположения. В «Альбоме», как правило, продвижение идет от малых скоростей к большим: от ползущих течений к ударным волнам и гиперзвуковому полету. Названия глав тоже носят несколько произвольный характер, и многие из приведенных фотографий могли бы оказаться с таким же успехом в какой-либо другой главе.

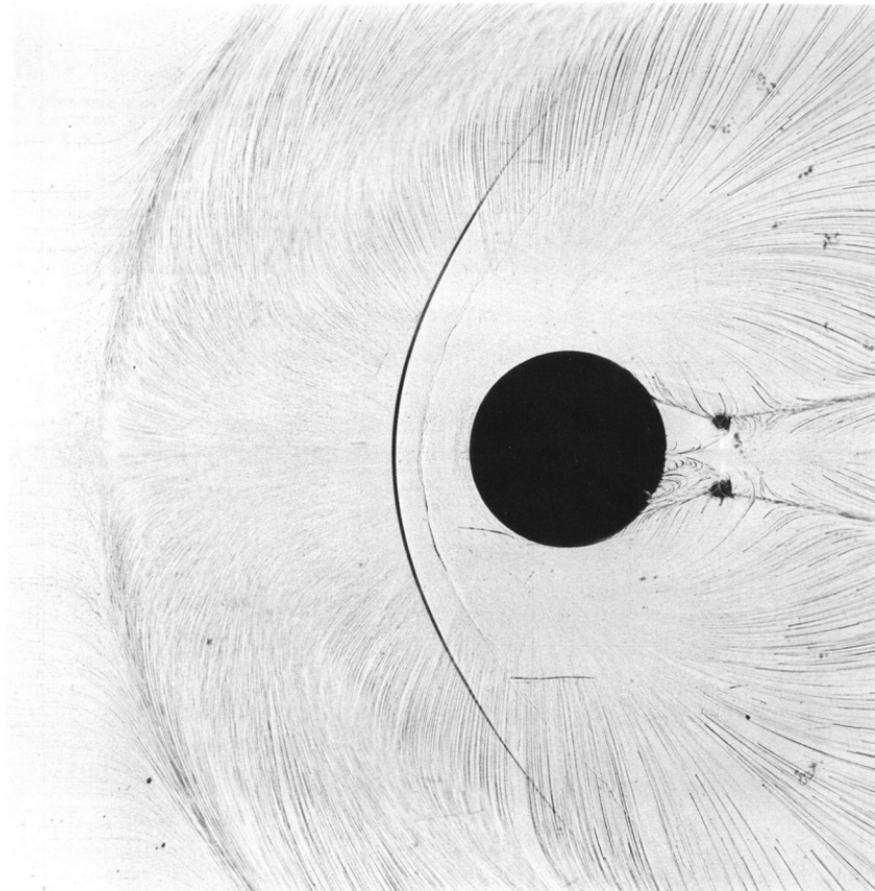
Чтобы свести к минимуму возможные недоразумения, в необходимых случаях негативы были перевернуты, так что при отсутствии специальных указаний поток всюду движется слева направо, а тело — справа налево. Серия последовательных фотографий типа представленной на фото 76 всегда располагается так, чтобы ее можно было читать как страницу комикса — слева направо, а затем сверху вниз. Если нет других указаний, число Рейнольдса рассчитывается по диаметру.

Всюду, где это было возможно, я давал подписи к фотографиям на просмотр коллеге, отобравшему данный снимок или предоставившему его мне, однако ответственность за любые ошибки или недостатки всецело лежит на мне. В конце подписи к каждому рисунку указывается источник соответствующего снимка, а если снимок был опубликован, то ссылка на публикацию идентифицируется фамилией и годом издания. Я не делал попыток пересчета единиц измерения, так что в подписях можно обнаружить приятную смесь сантиметров с дюймами.

Я надеюсь, что если данное собрание будет принято благоприятно, то за ним последует расширенное второе издание. Поэтому я прошу читателей информировать меня о любых выдающихся фотографиях, старых или новых, которые могли бы заполнить пробелы настоящего издания, и, если это возможно, высылать мне такие фотографии.

Я выражаю благодарность многим друзьям и коллегам за щедрую поддержку, совет и помощь. Кроме тех, кто внес свой вклад в собрание и упомянут в подписях, в их число входят: Андреас Акривос, Холт Эшли, Дж. К. Бэтчелор, Эмос Клэри, Доналд Коулз, Говард Эммонс, Дж. Э. Фоукс Вильямс, Сидней Голдстейн, Уэйланд Гриффитс, Лесли Хоуарт, Р. Т. Джонс, Фрэнк Кулачки, Джон Лауфер, Джордж К. Ли, Джеймс Лайтхилл, Джеффри Лилли, Э. Руне Линдgren, Джордж Г. Ланн, Д. У. Мур, М. В. Морковин, Э.-А. Моллер, Дж. Лейт Поттер, Г. Рейхенбах, Энн Рейнольдс, К. Г. Рёзнер, Филип Сэффмен, Рэй Седни, Гельмут Себекки, Кристофер Там, Стивен Трауготт, Эрнст Так, К. Дж. Вильямс и И Цзяшун.

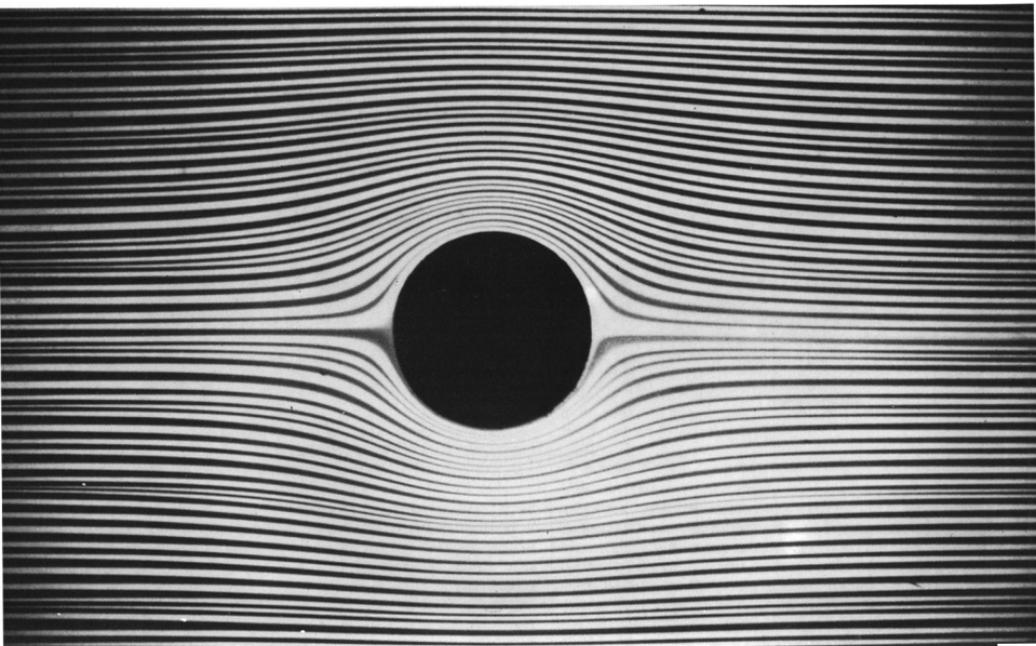
Милтон Ван-Дайк



Обтекание цилиндра, расположенного поперек сверхзвукового турбулентного пограничного слоя. В этом течении обнаруживается ряд явлений, изображенных на фотографиях в последующих главах. Круговой цилиндр диаметром 3,8 см и высотой 10 см прикреплен к окну сверхзвуковой аэродинамической трубы, где турбулентный пограничный слой имеет толщину 2,2 см. Число Маха свободного потока равно 2,50, а число Рейнольдса, рассчитанное по диаметру, равно 735 000. След отошедшей головной ударной волны получен при помощи искрового освещения в виде темной кривой, типичной для теневых картин. Выше по потоку тонкая пленка легкого масла, нанесенная на окно, отмечает линию первичного отрыва потока. За этой линией можно видеть поверхностные линии тока возвратного течения в первом из двух подк-

вообразных вихрей, оборачивающихся вокруг передней части цилиндра. Непосредственно вниз по потоку от головной волны параллельная ей и имеющая несколько неправильную форму линия представляет нормальную часть нестационарной маховской ножки, проникающей внутрь пограничного слоя из трехволновой конфигурации, возникающей при отрыве. Непосредственно перед цилиндром виден след линии обратного присоединения, связанной с гораздо меньшим вторым подковообразным вихрем. В ближайшем следе две большие темные точки указывают положение смерчоподобных вихрей, которые поднимаются с поверхности, изгибаются вниз по потоку и затем продолжают в виде пары концевых вихрей. [Sedney, Kitchens, 1975]

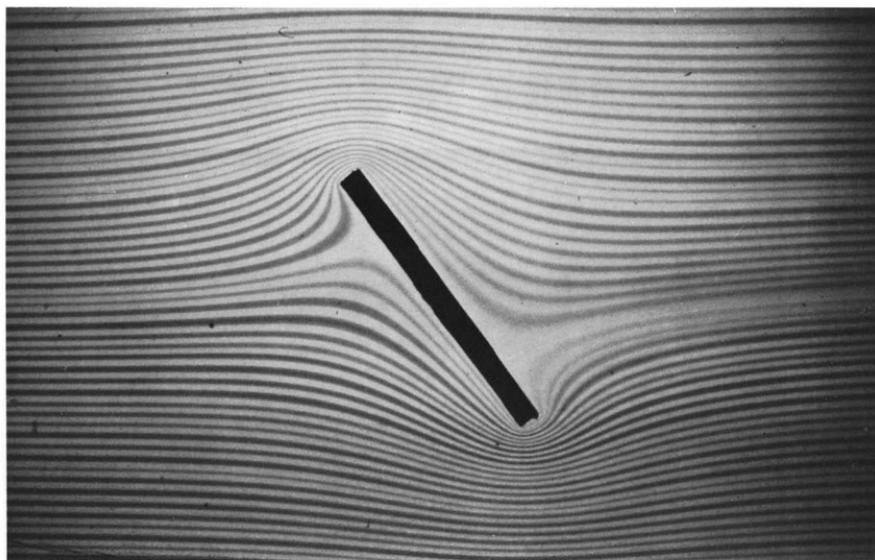
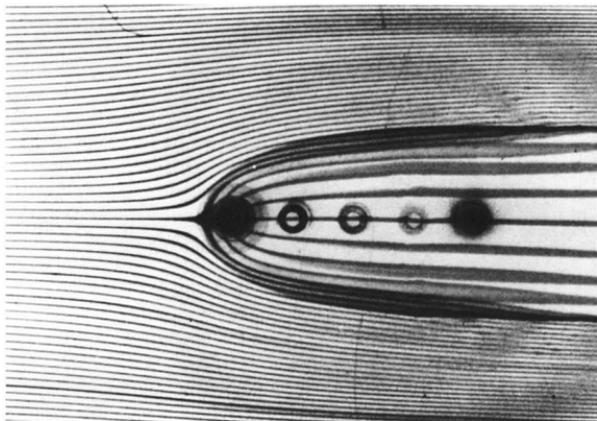
1. Ползущее течение



1. Обтекание круга в лотке Хил-Шоу. Подкраска позволяет увидеть линии тока в воде, текущей со скоростью 1 мм/с между двумя стеклянными пластинками, отстоящими на расстоянии одного миллиметра. На первый взгляд представляется парадоксальным, что наилучший способ получения безотрывной картины плоского потенциального

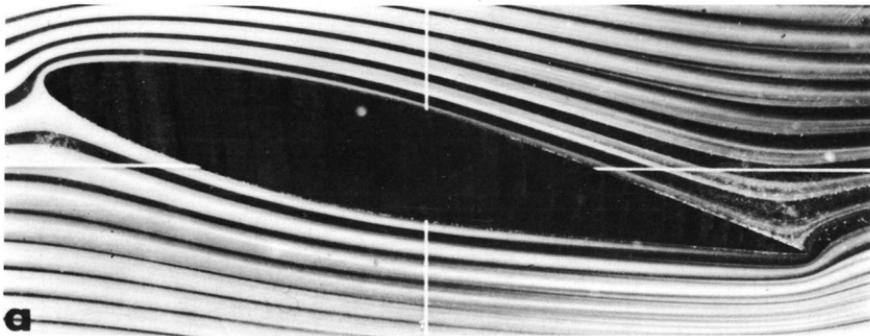
обтекания затупленного тела, которая была бы испорчена отрывом в реальной жидкости даже при самой малой вязкости, состоит в переходе к противоположному крайнему случаю ползущего течения в узком зазоре, для которого влияние сил вязкости является определяющим. Фото D. Н. Peregrine

2. Обтекание полутела Рэкина в лотке Хил-Шоу. Вязкая жидкость вводится через отверстие слева в однородный поток той же жидкости между стеклянными пластинками, отстоящими на 0,5 мм. Краска выявляет как внешние, так и внутренние линии тока плоского потенциального обтекания полубесконечного тела. Небольшая размытость линий тока объясняется тем, что расход жидкости, подводимой к источнику, менялся за время экспозиции. [Taylor, 1972]



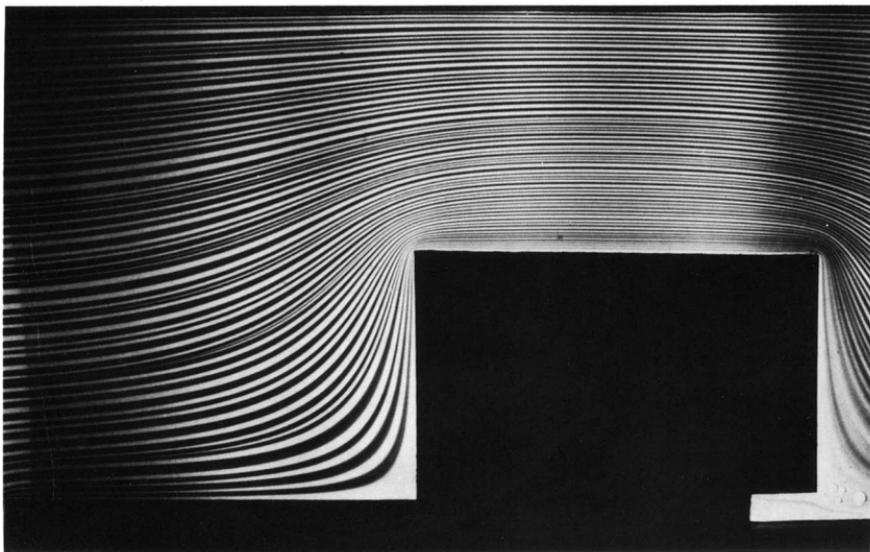
3. Обтекание наклонной пластинки в лотке Хил-Шоу. Аналоговое устройство Хил-Шоу не может представить течение с циркуляцией. Поэтому здесь видны линии тока потенциального обтекания наклонной пластинки при нулевой подъемной силе.

Краска течет в воде между стеклянными пластинками, отстоящими на расстоянии 1 мм. Фото D. H. Peregrine



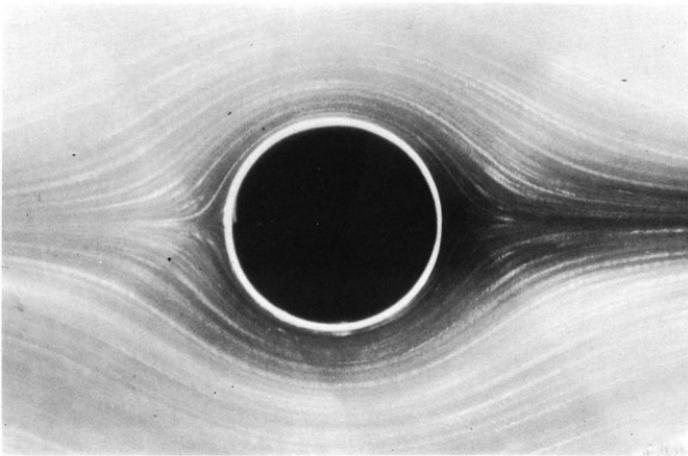
4. Обтекание наклонного профиля в лотке Хил-Шоу. Краска в потоке масла выявляет линии тока плоского потенциального обтекания профиля NASA 64A015 под углом атаки 13° . Однако, в силу того что в течении Хил-Шоу циркуляция не может создаваться, условие Чаплыгина – Жуковского на

задней кромке не имеет места. Поэтому здесь получаются бесконечные скорости. Модель расположена между стеклянными пластинками, отстоящими на 1 мм. [Werlé, 1973]. Воспроизведено с разрешения издательства из Annual Review of Fluid Mechanics, Vol. 5. © 1973 by Annual Reviews Inc.



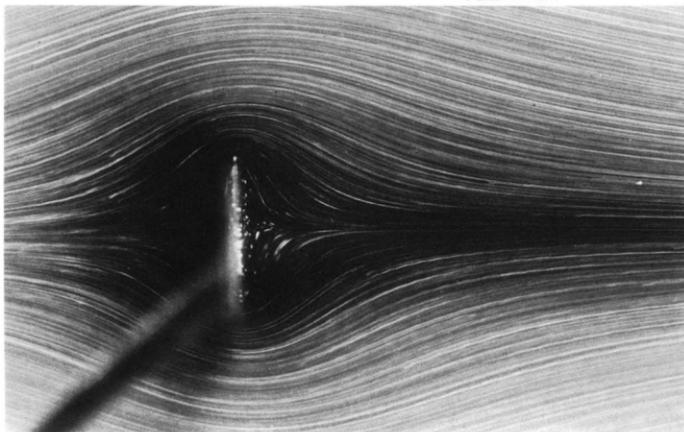
5. Обтекание прямоугольного выступа на пластинке в лотке Хил-Шоу. Аналоговое устройство безотказно моделирует безотрывное потенциальное течение в застойной области внутри вогнутого угла и бесконечные скорости у внешнего угла. Вода движется через систему значительно медленнее,

следуя тем линиям тока, которые проходят вблизи критической точки. Это приводит к большему диффузионному размыванию краски, проявляющемуся в легкой размытости линий тока в нижнем правом углу снимка. Фото D. H. Peregrine



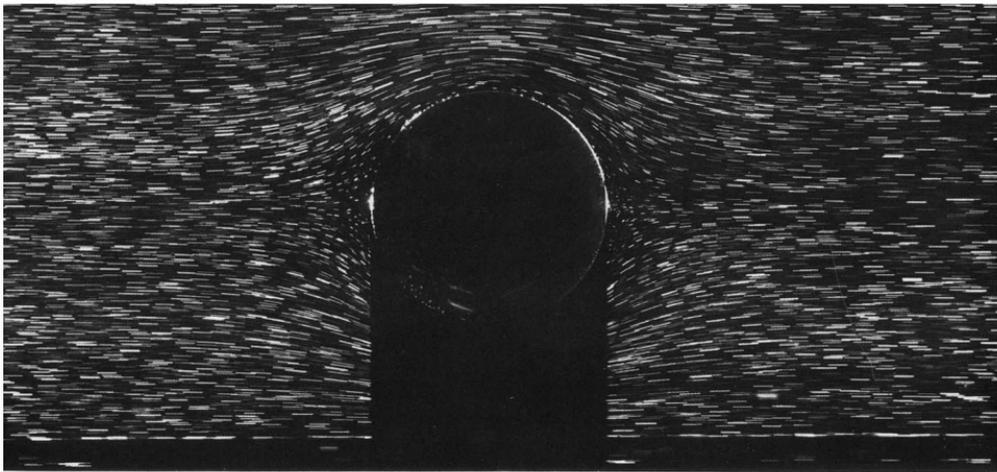
6. Обтекание кругового цилиндра однородным потоком при $Re = 0,16$. Картина расположения линий тока с трудом позволяет определить, что поток движется слева направо. Это объясняется тем, что в пределе нулевого числа Рейнольдса обтекание твердого тела обратимо и, следовательно, симметрично при симметричной форме тела. На первый

взгляд эта картина напоминает картину потенциального обтекания, показанную на фото 1, однако возмущения однородного потока затухают здесь значительно медленнее. Для визуализации течения воды применен алюминиевый порошок. Фото Sadatoshi Taneda



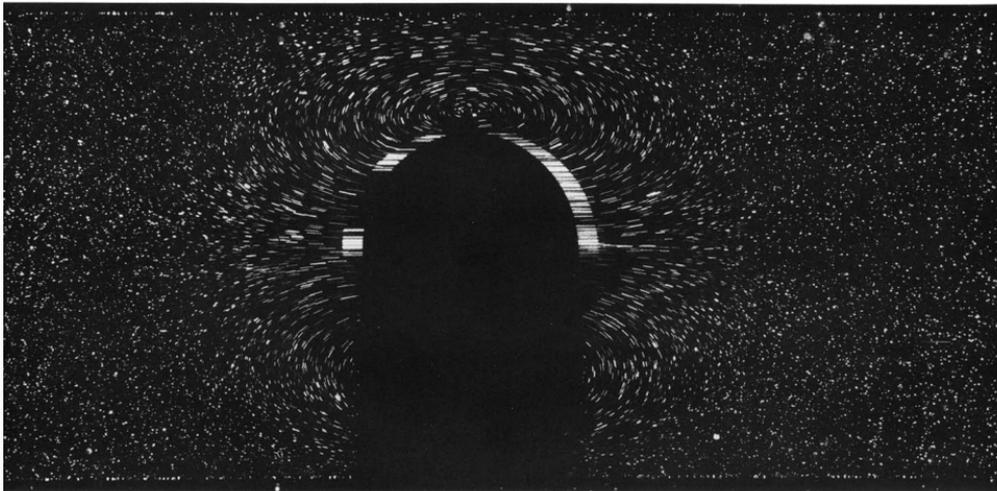
7. Обтекание пластинки нормальным к ней однородным потоком при $Re = 0,334$. Картина расположения линий тока перед и за пластинкой по-прежнему остается почти симметричной и при немного

большем числе Рейнольдса. Возможно, однако, что на задней стороне пластинки произошел отрыв потока. Алюминиевый порошок позволяет видеть течение глицерина. [Taneda, 1968]



8. Шар, движущийся в трубе при $Re = 0,10$; относительное движение. Шар свободно падает с постоянной скоростью вдоль оси трубы, имеющей вдвое больший диаметр и наполненной глицерином. Камера движется с той же скоростью, что и шар,

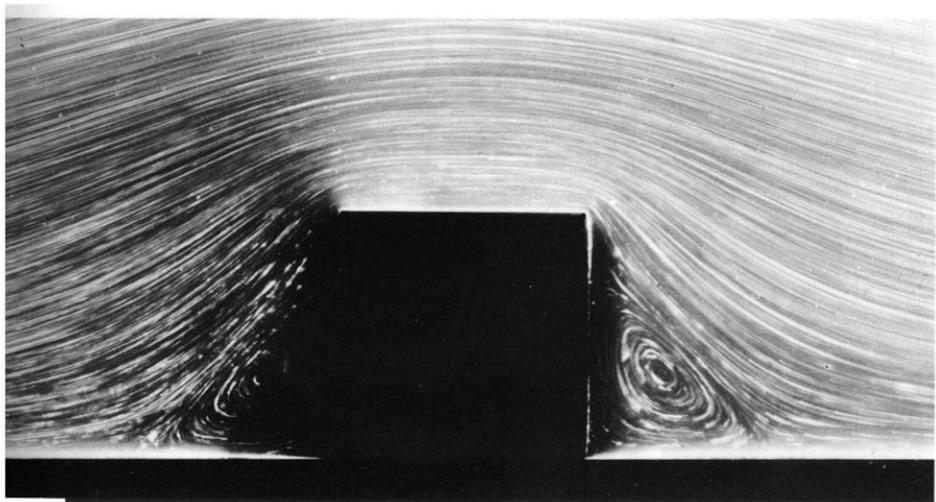
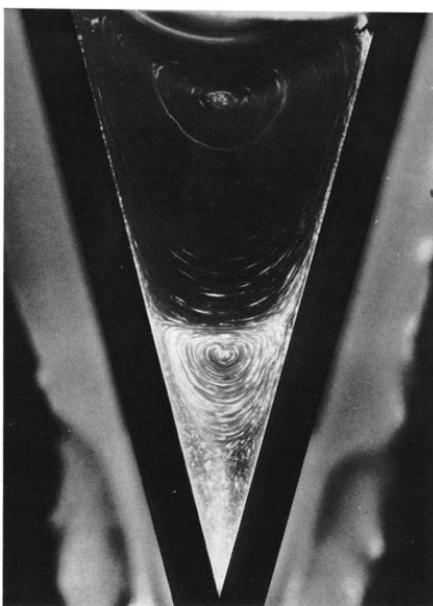
чтобы заснять структуру относительного течения. Снимок повернут так, чтобы поток представлялся движущимся слева направо. Мелкие магнитные опилки освещены тонким световым ножом, который создает тень от шара. [Coutanceau, 1968]



9. Шар, движущийся в трубе при $Re = 0,10$; абсолютное движение. В отличие от предыдущего снимка камера здесь остается неподвижной относительно удаленной от шара жидкости. За время экспозиции снимка шар продвинулся слева направо на расстояние, меньшее одной десятой диаметра; это

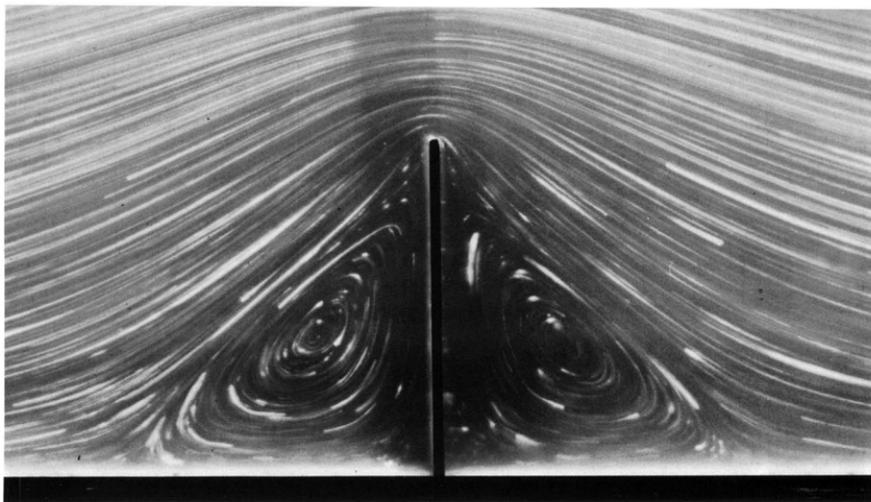
показывает абсолютное движение жидкости. При столь малом числе Рейнольдса картина течения, визуализируемая с помощью магнитных опилок в масле, выглядит совершенно симметричной спереди шара и за ним. [Coutanceau, 1968]

10. Ползущее течение внутри клина. Жидкость приводится в движение равномерным вращением по часовой стрелке кругового цилиндра, нижняя часть которого видна непосредственно под свободной поверхностью в верхней части снимка. Визуализация осуществляется с помощью алюминиевого порошка в воде. Число Рейнольдса, рассчитанное по окружной скорости и высоте клина, равно 0,17. Девяностоминутная экспозиция выявляет первые два вихря из теоретически бесконечной цепочки вихрей (последовательно уменьшающихся), простирающейся до вершины угла. Для данного клина с полным углом раствора $28,5^\circ$ каждый вихрь оказывается в 1000 раз слабее своего соседа сверху. Третий вихрь всегда настолько слаб, что нет никакой уверенности в том, что его кто-либо когда-либо наблюдал. [Taneda, 1979]



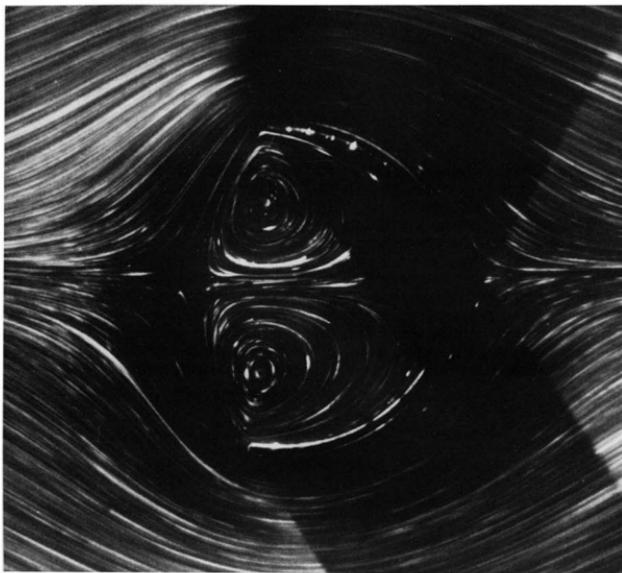
11. Ползущее течение при обтекании квадратного выступа на пластинке. Число Рейнольдса, рассчитанное по стороне квадрата, равно 0,02. В отличие от линий тока безотрывного потенциального обтекания, показанных на фото 5, изображенное здесь плоское течение имеет две области отрыва, которые расположены симметрично спереди выступа

и за ним и в которых образуются большие рециркуляционные вихри. В углах должны существовать последовательно меньших и более слабых вихрей аналогично течению в клине, показанному на фото 10. Визуализация осуществляется с помощью стеклянных шариков в глицерине. [Taneda, 1979]

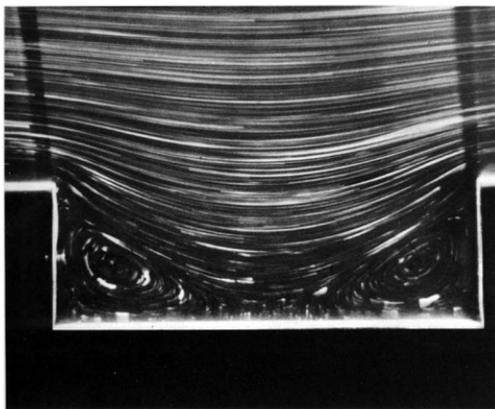


12. Обтекание барьера однородным потоком при $Re = 0,014$. Визуализация с помощью алюминиевого порошка в глицерине показывает в чистом ви-

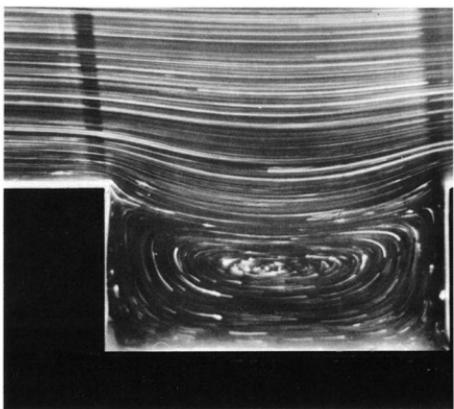
де те области отрыва, которые возникают на предыдущем снимке перед выступом и за ним. [Taneda, 1979]



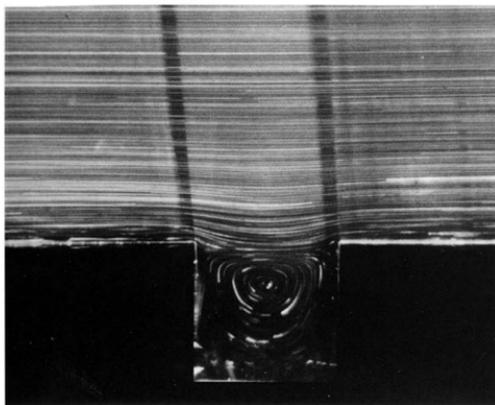
13. Линии тока при обтекании дуги полукруга. При числе Рейнольдса, равном здесь $0,031$, картина линий тока не претерпевает ощутимых изменений, когда направление потока обращается. Центры пары вихрей внутри каверны находятся на расстоянии $0,52$ диаметра, что хорошо согласуется с решением в приближении Стокса. Алюминиевый порошок, диспергированный в глицерине, освещается световым ножом. [Taneda, 1979]



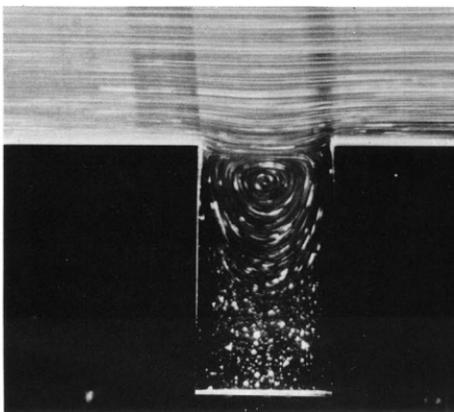
$b/h = 3$



$b/h = 2$



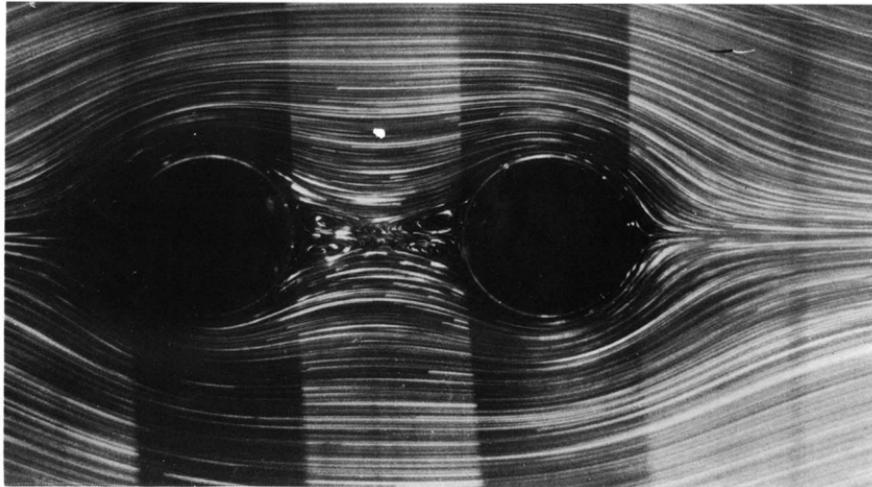
$b/h = 1$



$b/h = 0,5$

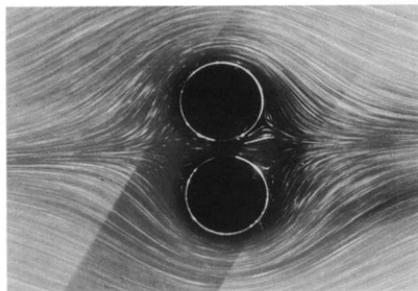
14. Ползущее течение при обтекании прямоугольной каверны. Линии тока визуализируются при помощи алюминиевого порошка в глицерине. Число Рейнольдса, рассчитанное по высоте каверны, равно 0,01. По мере уменьшения ширины каверны под первичным вихрем начинает расти вторичный.

При стремлении к нулю отношения ширины к высоте образуется бесконечная последовательность вихрей, как в клине на фото 10, причем каждый из вихрей слабее своего предшественника в 365 раз. [Taneda, 1979]

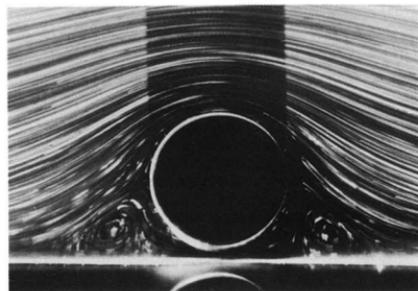


15. Ползущее течение при обтекании двух кругов в tandem. Зазор между кругами равен одному диаметру, а число Рейнольдса равно 0,01. Для визуализации линий тока применяется алюминиевый порошок в глицерине. Взаимодействие кругов по-

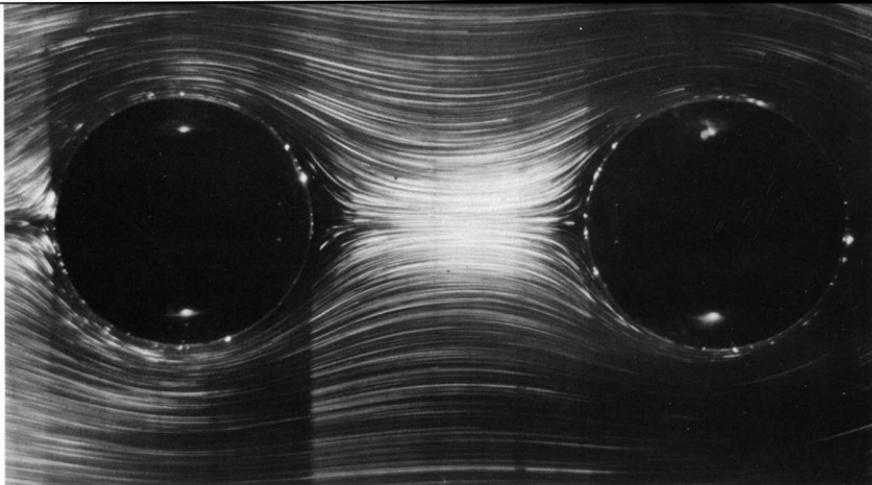
рождает отрыв при любой скорости, тогда как при обтекании изолированного кругового цилиндра поток отрывается лишь при числе Рейнольдса, превышающем 5. [Taneda, 1979]



16. Ползущее течение при обтекании двух расположенных рядом кругов. Число Рейнольдса равно 0,011, а зазор между кругами составляет 0,2 их диаметра. Как показывает визуализация с помощью алюминиевого порошка в глицерине, заметного отрыва здесь не наблюдается. [Taneda, 1979]



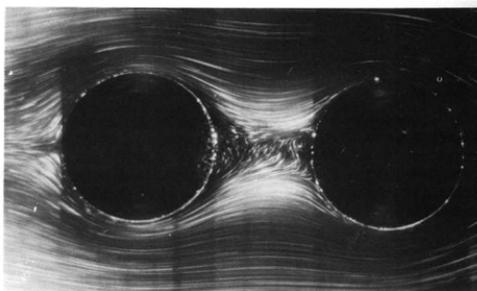
17. Круг в медленном потоке с линейным сдвигом вблизи пластинки. Цилиндр отодвинут на 0,1 диаметра от пластинки, или на 0,2 диаметра от своего гидродинамического отражения, которое видно здесь фактически как оптическое отражение. Число Рейнольдса, рассчитанное по скорости сдвига, равно 0,011. Большие рециркуляционные вихри вторичного течения образуются из-за того, что в отличие от потока на предыдущей фотографии, где происходит движение вдоль плоскости симметрии, глицерин должен прилипать к пластинке. [Taneda, 1979]



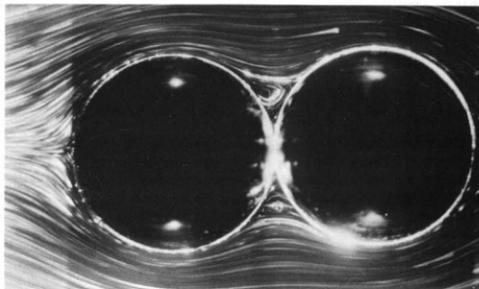
18. Ползущее течение при обтекании двух шаров в tandem. При том же зазоре и примерно при том же числе Рейнольдса, что и для кругов на предыдущей странице, поток, обтекающий шары, не обнаруживает признаков отрыва. Это согласуется с тем фактом, что при обтекании изолированной сферы

отрыв возникает только при числе Рейнольдса, превышающем 20, по сравнению со значением 5 для круга. Визуализация осуществлена путем освещения алюминиевого порошка в глицерине. [Taneda, 1979]

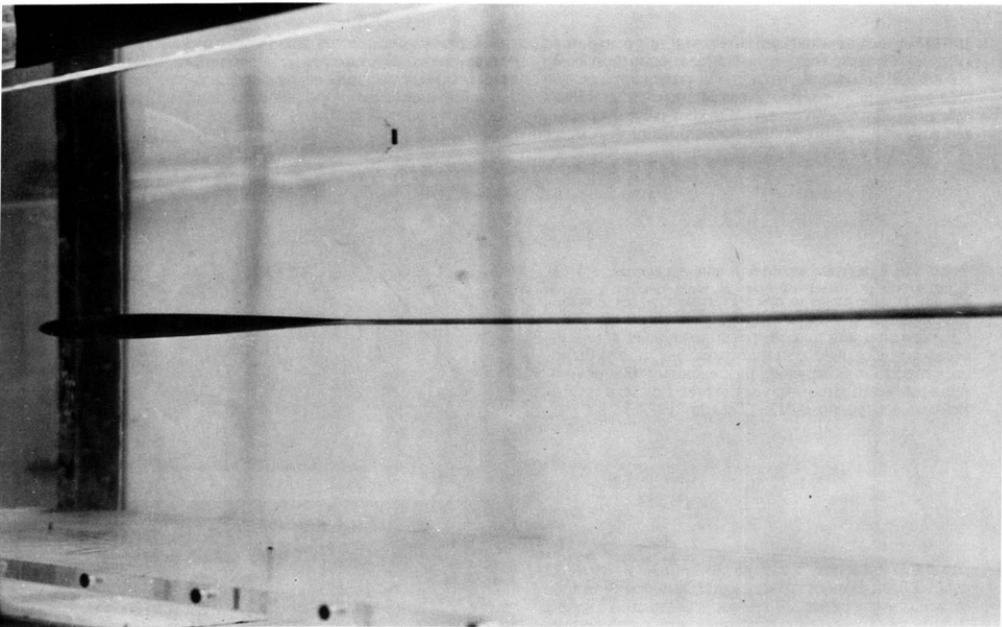
19. Ползущее течение при обтекании более близко расположенных шаров. При зазоре, составляющем 0,7 диаметра для шаров, расположенных в tandem, картина отрыва весьма похожа на то, что было на фото 15 для кругов, разделенных зазором в один диаметр. Диаметр составляет 1,6 см, а число Рейнольдса равно 0,013. [Taneda, 1979]



20. Ползущее течение при обтекании соприкасающихся шаров. При том же числе Рейнольдса, равном 0,013, две пары вихревых колец, видимых на предыдущем снимке, слились здесь в одну единственную пару. Как и в случае клина на фото 10, теория предсказывает здесь появление бесконечной последовательности вихревых колец, сгущающихся к точке контакта. [Taneda, 1979]



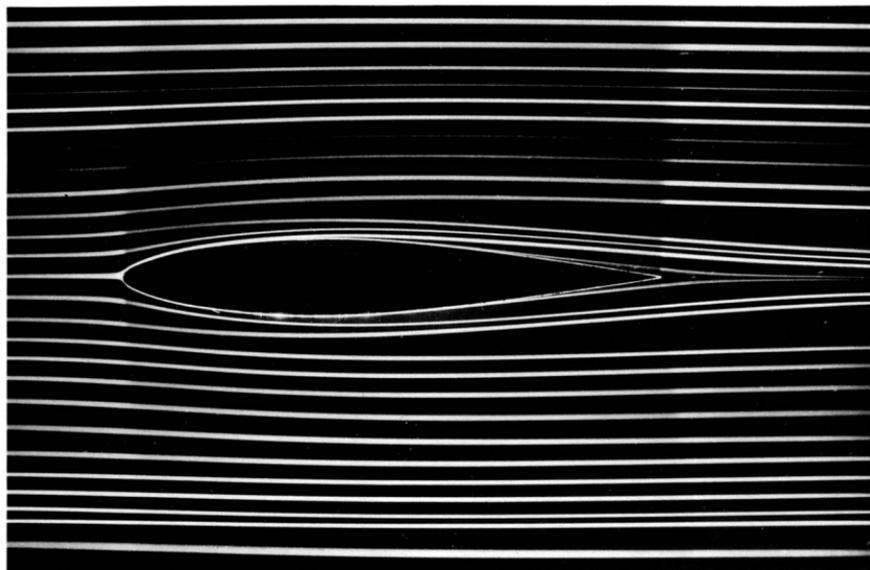
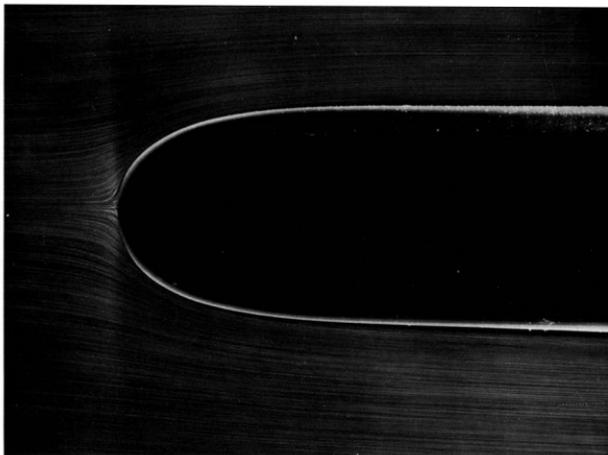
2. Ламинарное течение



21. Ламинарный след за тонким телом вращения. Тонкое тело вращения с заостренным хвостом подвешено на тонких вольфрамовых проволочках и тщательно выровнено по направлению вдоль невозмущенного потока в гидродинамической трубе. Число Рейнольдса, рассчитанное по максимально-

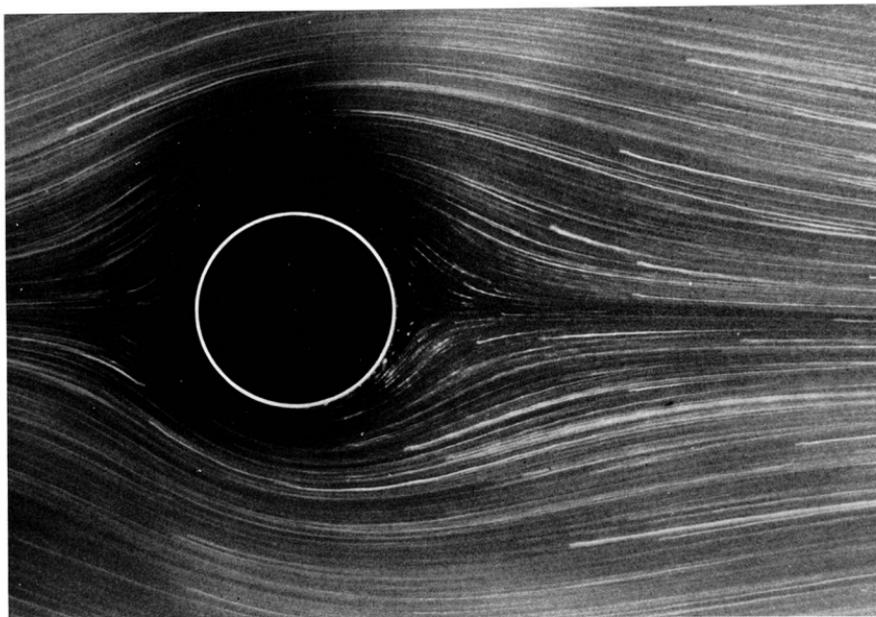
му диаметру, равно 3600. Краска, введенная в пограничный слой, показывает ядро следа, остающегося в пределах данного снимка ламинарным. Неустойчивость в форме расширений и сужений и переход к турбулентности возникает в более далеких областях вниз по потоку. Фото Francis Nama

22. Осесимметричное обтекание оживального тела Рэнкина. Обтекает тело вращения, которое создается точечным потенциальным источником, помещенным в однородный поток, — осесимметричный аналог плоского полутела, показанного на фото 2. Это тело имеет настолько плавные очертания, что при нулевом угле атаки и при числе Рейнольдса, рассчитанном по диаметру и равном 6000, поток остается безотрывным и ламинарным. Визуализация линий тока осуществлена с помощью мелких пузырьков воздуха в воде, освещенных световым ножом в срединной плоскости. Фото ONERA. [Werlé, 1962]



23. Симметричное обтекание профиля плоским потоком. Профиль NACA 64A015 помещен в гидродинамическую трубу при нулевом угле атаки. Число Рейнольдса, рассчитанное по длине хорды, равно 7000. Линии тока визуализировались с по-

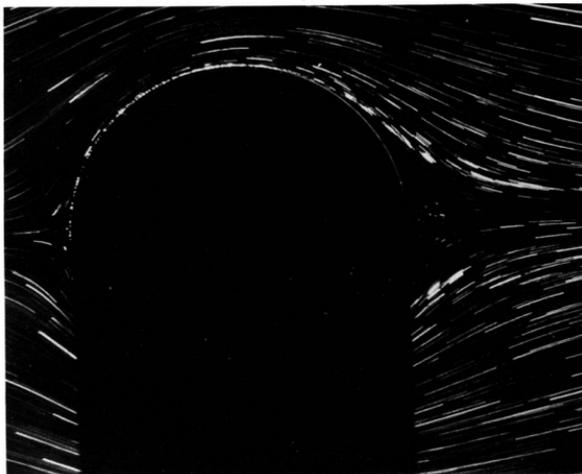
мощью подкрашенной жидкости, вводимой выше по потоку. Течение, очевидно, ламинарно и, по-видимому, безотрывно, хотя вблизи задней кромки можно было бы ожидать появления небольшой области отрыва. Фото ONERA. [Werlé, 1974]

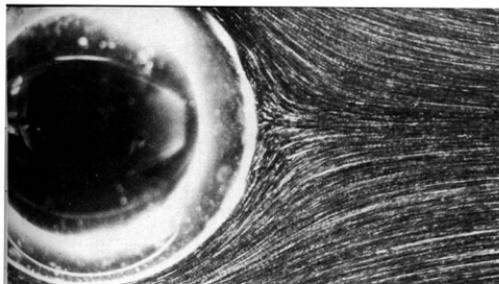


24. Обтекание кругового цилиндра при $Re = 1,54$. При этом числе Рейнольдса картина линий тока, очевидно, уже потеряла ту симметрию передней и задней частей, которая имела место на фото 6. Однако поток сзади все же еще не оторвался. Отрыв

начинается примерно при $Re = 5$, хотя значение числа Рейнольдса начала отрыва точно неизвестно. Линии тока визуализированы с помощью алюминиевого порошка в воде. Фото Sadatoshi Taneda

25. Обтекание шара при $Re = 9,8$. Здесь также ясно видно, что при пренебрежимо малом влиянии стенок картина линий тока явно асимметрична в противоположность картине ползущего течения на фото 8. Ясно видно, что в кормовой области жидкость движется очень медленно, что затрудняет оценку начала отрыва. Предполагается, что поток остается здесь присоединенным, так как считается, что отрыв начинается после $Re = 20$. Визуализация линий тока осуществляется с помощью магневых опилок, освещенных в воде. Фото Madeleine Coutanceau, Michele Payard

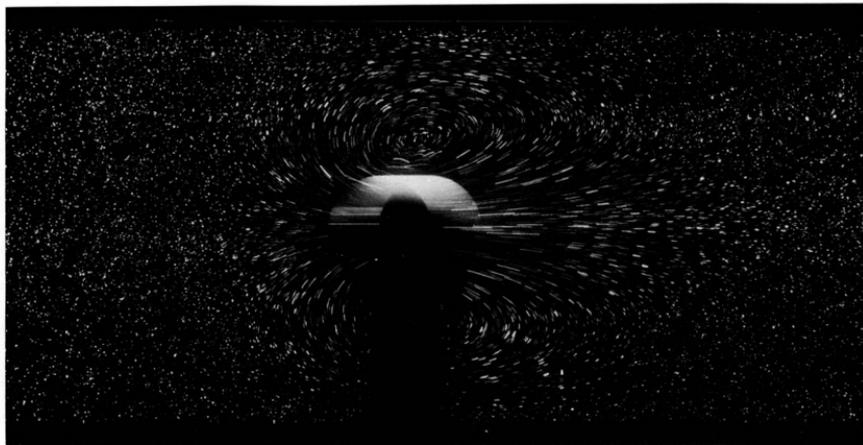




26. Течение за шаром при $Re = 8,15$. Стальной шар от шарикоподшипника, поддерживаемый в поперечном направлении тонкой фортепианной струной, протягивается сквозь воду, содержащую взвешенный в ней алюминиевый порошок и освещаемую световым ножом в экваториальной плоскости. Ясно видно, что течение еще не отрывное. Фото Sadatoshi Taneda



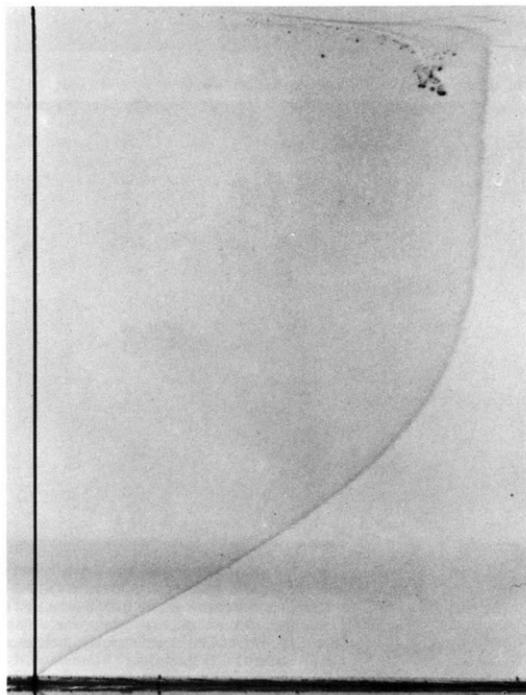
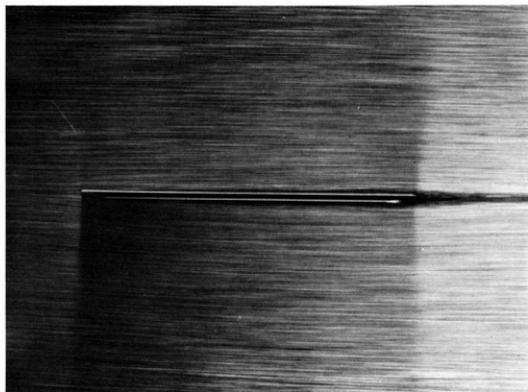
27. Течение за шаром при $Re = 17,9$. При увеличении скорости весьма трудно уловить момент начала отрыва в задней точке. Здесь поток должен быть еще присоединенным, так как вся эта серия экспериментов показала, что отрыв за изолированным шаром наступает примерно при $Re = 24$. [Taneda, 1956b]



28. Шар, движущийся в трубе при $Re = 6,9$; абсолютное движение. Диаметр шара составляет одну четверть диаметра трубы. Шар сдвинулся влево на один радиус. В противоположность картине ползущего движения на фото 9 при этом умеренном числе Рейнольдса наблюдается зарождение следа:

возмущения за шаром распространяются значительно дальше, чем впереди него. Визуализация с помощью освещаемых магниевых опилок в силиконовом масле. Archives de l'Académie des Sciences de Paris. [Coutanceau, 1972]

29. Плоская пластинка под нулевым углом атаки. Пластинка имеет относительную толщину 2% , на кромках снята фаска. При числе Рейнольдса, рассчитанном по длине пластинки и равном $10\,000$, однородный поток оказывается лишь слегка возмущенным за счет тонкого ламинарного пограничного слоя и следующего за ним ламинарного следа. Толщина и того и другого составляет лишь несколько процентов длины пластинки. Это согласуется с результатом теории Прандтля, согласно которой толщина пограничного слоя изменяется пропорционально квадратному корню из числа Рейнольдса. Визуализация с помощью пузырьков воздуха в воде. Фото ONERA. [Wergé, 1974]



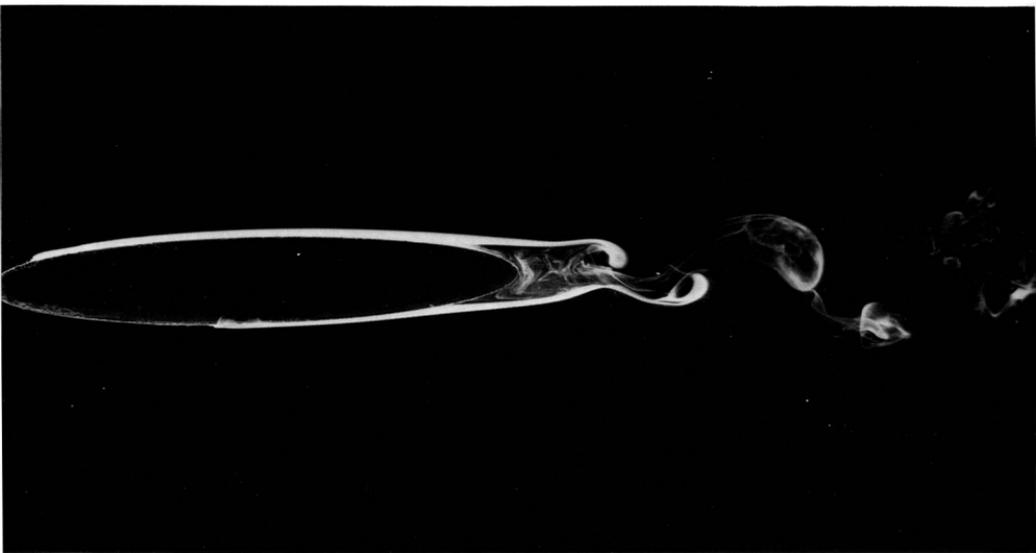
30. Профиль Блазиуса пограничного слоя на плоской пластинке. Профиль тангенциальной составляющей скорости в ламинарном пограничном слое на плоской пластинке, открытым Прандтлем, точно вычисленный Блазиусом, визуализируется с помощью теллура. Вода течет со скоростью 9 см/с . Число Рейнольдса, рассчитанное по расстоянию сечения от передней кромки, равно 500 , а толщина вытеснения равна примерно 5 мм . Тонкая теллуровая проволока в левой части снимка, протянутая перпендикулярно пластинке, подвергается воздействию электрического импульса продолжительностью в несколько миллисекунд. Химическая реакция порождает тонкое коллоидное облако, которое дрейфует вместе с потоком и мгновенно позже фотографируется с целью фиксации профиля скорости. Фото F. X. Wortmann



31. Вторичные течения, индуцируемые колеблющимся цилиндром. Длинный круговой цилиндр колеблется в смеси воды с глицерином по направлению нормали к своей оси под действием громкоговорителя. Взвешенные в жидкости стеклянные шарики подсвечиваются в поперечной плоскости стробоскопом. Амплитуда колебаний составляет

0,17 радиуса, а число Рейнольдса, рассчитанное по частоте и радиусу, равно 70. Установившееся вторичное течение направлено вдоль оси колебаний (обозначенной стрелками) во внутренней области к телу и во внешней – в противоположном направлении. Фото Masakazu Tatsuno

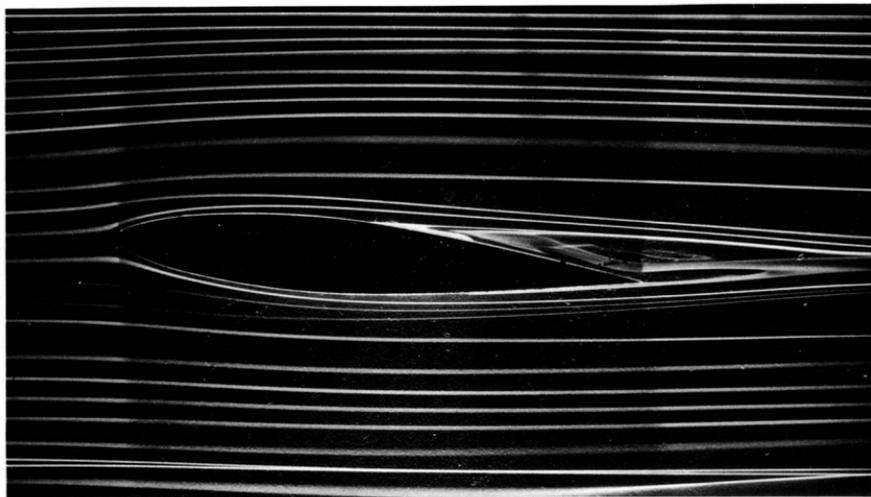
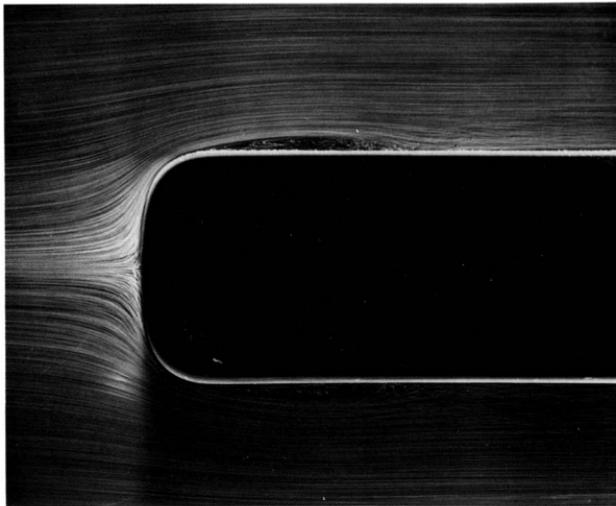
3. Отрыв течения



32. Ламинарный отрыв на тонком эллипсе. Эллиптический цилиндр с отношением осей 6 : 1 установлен под нулевым углом атаки в аэродинамической трубе. Число Рейнольдса, рассчитанное по хорде, равно 4000. Капли четыреххлористого титана на

обтекаемой поверхности создают белый дым, который и указывает на наличие отрыва пограничного слоя в кормовой части цилиндра. [Bradshaw, 1970]

33. Отрыв пограничного слоя на теле вращения. Обтекаемое тело затуплено сильнее, чем показанное на фото 22 тело Ранкина оживальной формы, настолько, что при том же числе Рейнольдса, рассчитанном по диаметру и равном 6000, и при том же нулевом угле атаки ламинарный пограничный слой отрывается. Затем пограничный слой быстро становится турбулентным и вновь присоединяется к поверхности, окружая собой короткую и тонкую область рециркуляционного течения. Визуализация с помощью воздушных пузырьков в воде. Фото ONERA. [Werlé, 1962]



34. Отрыв пограничного слоя на профиле под углом атаки. Если профиль NASA 64A015, показанный на фото 23, увеличивает свой угол атаки до 5° , то ламинарный пограничный слой отрывается на задней половине верхней поверхности. Поток на ниж-

ней поверхности, однако, остается присоединенным и сходит с нее по касательной у задней кромки. Линии тока визуализируются с помощью струек окрашенной жидкости в воде. Фото ONERA. [Werlé, 1974]



35. Отрыв у передней кромки пластинки с ламинарным обратным присоединением. Плоская пластинка относительной толщины 2% с кромками со снятой фаской наклонена под углом атаки $2,5^\circ$ к потоку. Ламинарный пограничный слой отрывается от верхней поверхности у передней кромки. При данном числе Рейнольдса, рассчитанном по длине

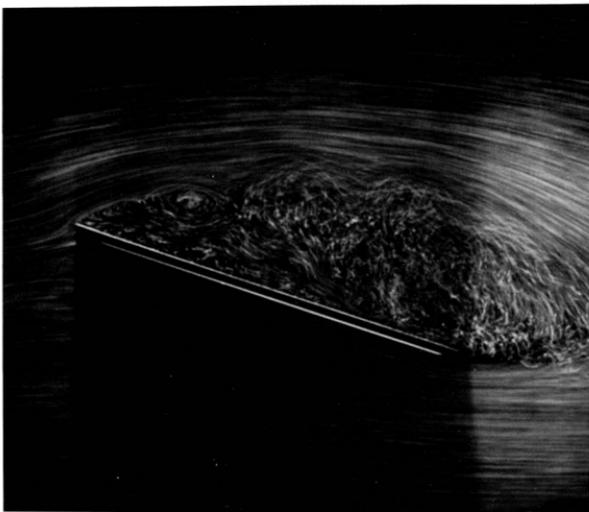
и равном 10000, пограничный слой впоследствии присоединяется обратно, оставаясь ламинарным и охватывая длинный переднекрюмочный «пузырь» рециркулирующей жидкости. Визуализация с помощью воздушных пузырьков в воде. Фото ONERA. [Werlé, 1974]

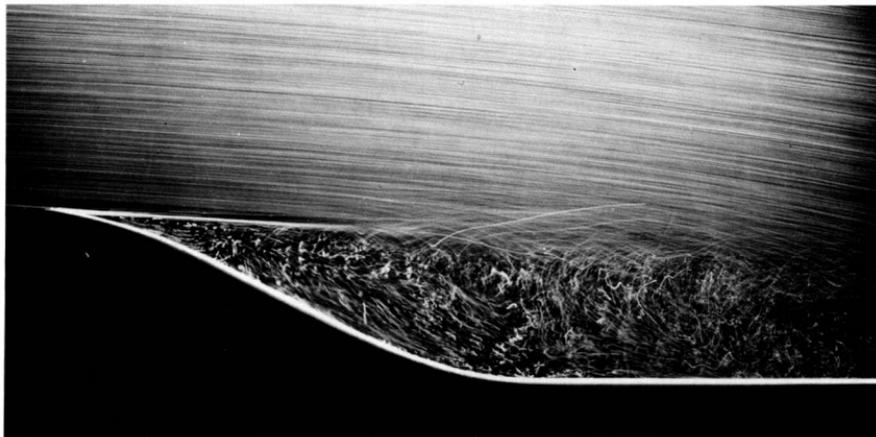


36. Отрыв у передней кромки пластинки с турбулентным обратным присоединением. Пластинка тоже установлена под углом атаки $2,5^\circ$, но при более высоком числе Рейнольдса, равном 50000. Теперь пограничный слой, прежде чем присоединиться

обратно, становится турбулентным и поэтому охватывает короткую рециркуляционную область. Воздушные пузырьки визуализируют течение воды. Фото ONERA. [Werlé, 1974]

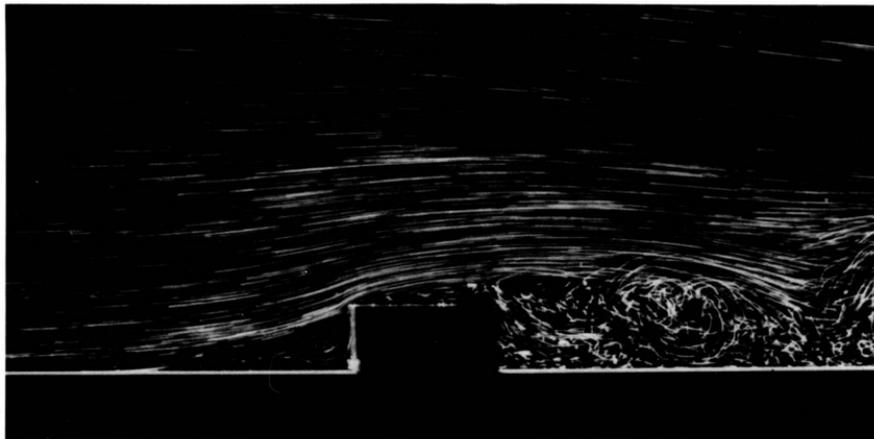
37. Глобальный отрыв над пластинкой под углом атаки. По мере увеличения угла атаки локальная зона ламинарного отрыва у передней кромки, показанная выше, быстро распространяется в направлении задней кромки. В данном случае, при числе Рейнольдса 10000 и угле атаки 20° , отрыв течения имеет место на всей верхней поверхности. Фото ONERA. [Werlé, 1974]





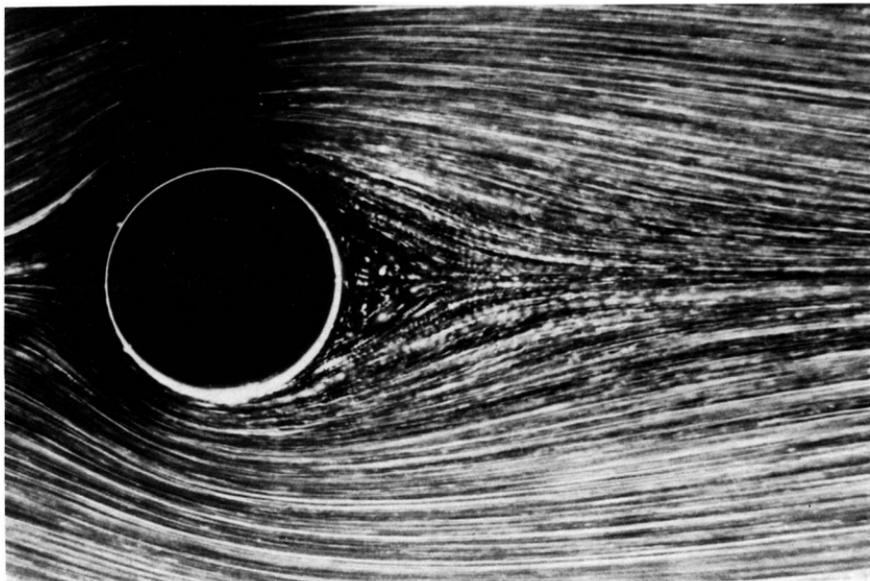
38. Ламинарный отрыв на искривленной стенке. Воздушные пузырьки в воде показывают отрыв ламинарного пограничного слоя, число Рейнольдса которого, рассчитанное по расстоянию от передней кромки, равно 20 000 (передняя кромка здесь не показана). Поскольку пограничный слой

свободен от пузырьков, он проявляется слева в виде тонкой темной линии и отрывается по касательной вблизи начала выпуклой поверхности, оставаясь ламинарным там, где видна темная линия, а затем становится неустойчивым и турбулентным. Фото ONERA. [Werlé, 1974]



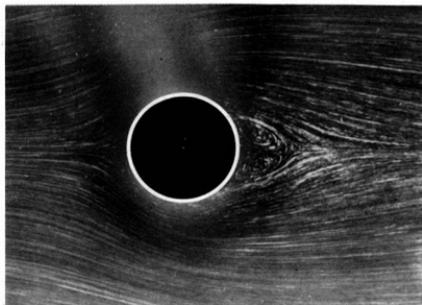
39. Турбулентный отрыв при обтекании прямоугольного выступа на пластинке. Высота выступа велика по сравнению с толщиной набегающего на него ламинарного пограничного слоя. Течение практически плоское, поэтому рециркуляционная

область перед выступом оказывается замкнутой, тогда как в аналогичном трехмерном течении, показанном на фото 92, она открыта и растекается в стороны по бокам. Фото ONERA. [Werlé, 1974]

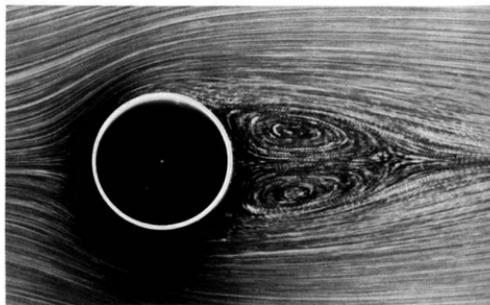


40. Обтекание кругового цилиндра при $Re = 9,6$. В противоположность картине, показанной на фото 24, здесь ясно видно, что произошел отрыв и образовалась пара рециркуляционных вихрей. Цилиндр движется в бассейне с водой, содержащей алюминиевый порошок, и подсвечивается све-

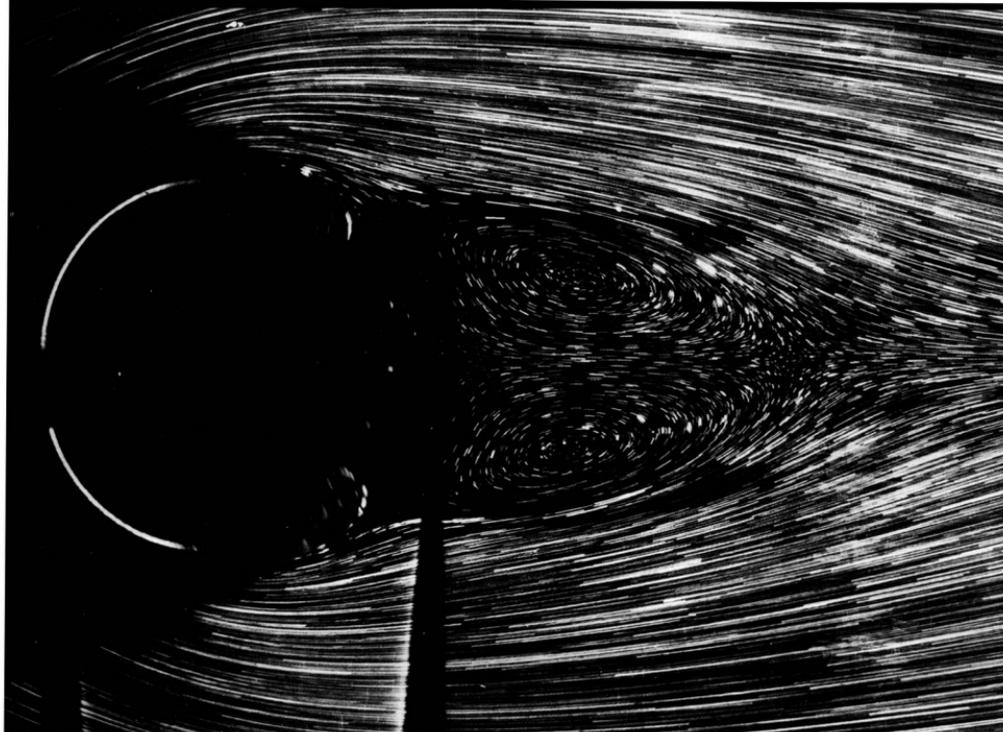
товым ножом под свободной поверхностью. Экстраполяция результатов подобных экспериментов на случай неограниченного потока указывает на возможность отрыва при $Re = 4 - 5$, тогда как большинство численных расчетов дает $Re = 5 - 7$. Фото Sadatoshi Taneda



41. Обтекание кругового цилиндра при $Re = 13,1$. По мере увеличения скорости неподвижные вихри начинают вытягиваться в направлении потока. Найдено, что их длина линейно растет с ростом числа Рейнольдса, пока течение не становится неустойчивым при значении Re , превышающем 40. [Taneda, 1956a]

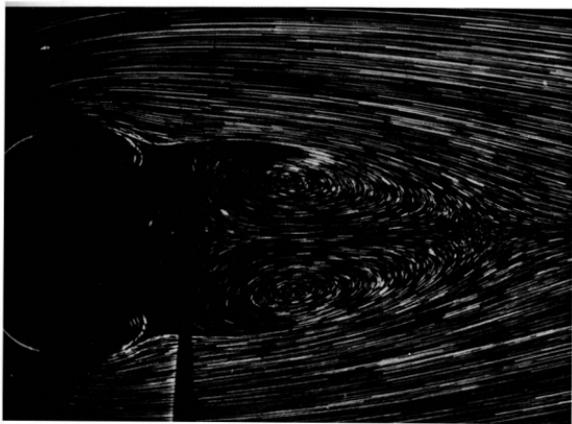


42. Обтекание кругового цилиндра при $Re = 26$. Расстояние вниз по потоку до центров вихрей также линейно возрастает с ростом числа Рейнольдса. Однако поперечное расстояние между центрами вихрей возрастает по закону, скорее близкому к закону квадратного корня. Фото Sadatoshi Taneda

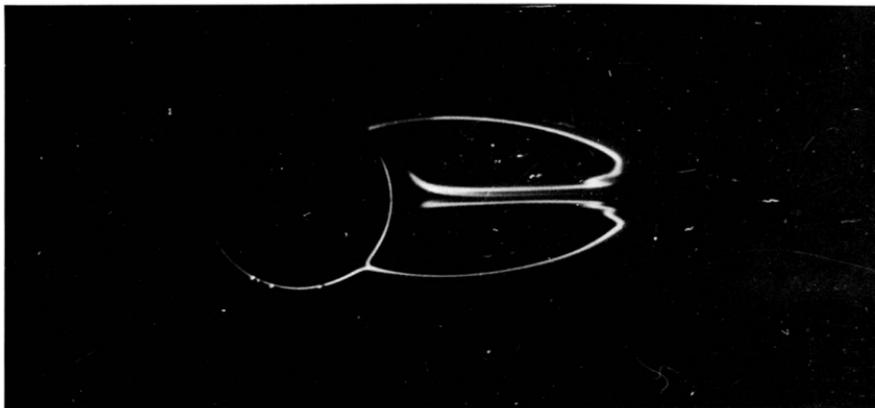


43. Обтекание кругового цилиндра при $Re = 24,3$. Другое изображение того же течения получается при движении цилиндра в масле. Мелкие магнитные опилки освещаются световым ножом, идущим от дугового прожектора. Два темных клина

под кругом представляют собой некоторый оптический эффект. Измерялись длины отрезков траекторий отдельных частиц; это позволяло определить поле скоростей с точностью до 2%. [Coutanseau, Bouard, 1977]

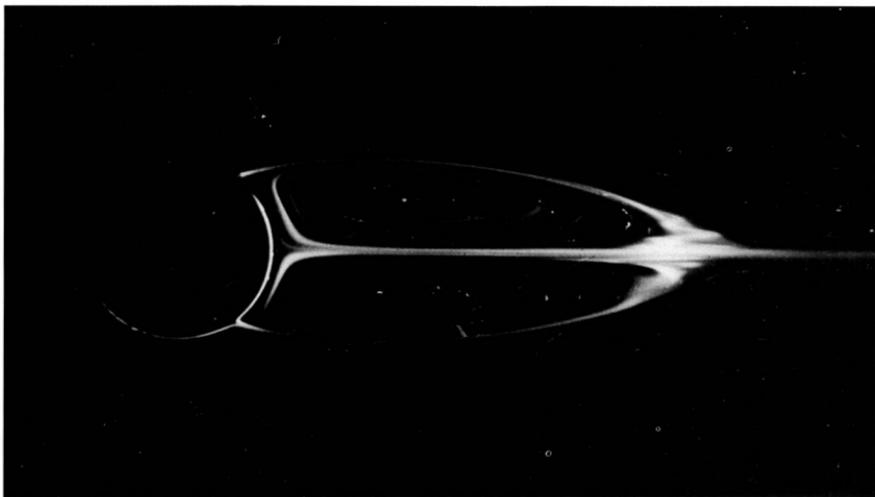


44. Обтекание кругового цилиндра при $Re = 30,2$. Течение остается здесь по-прежнему вполне установившимся, причем рециркуляционный след имеет длину более одного диаметра. Стенки бассейна, отстоящие от цилиндра на 8 его диаметров, при таких скоростях оказывают весьма малое влияние. Фото Madeleine Coutanseau, Roger Bouard



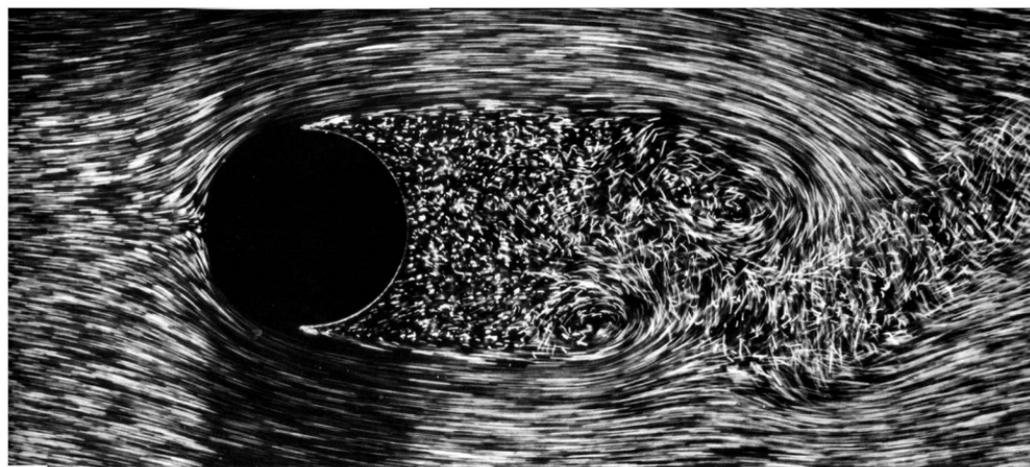
45. Обтекание кругового цилиндра при $Re = 28,4$. Здесь была сделана видимой только самая граница рециркуляционной области. Для этого поверх-

ность цилиндра была покрыта сгущенным молоком, и сам цилиндр приведен в движение в воде. [Taneda, 1955]



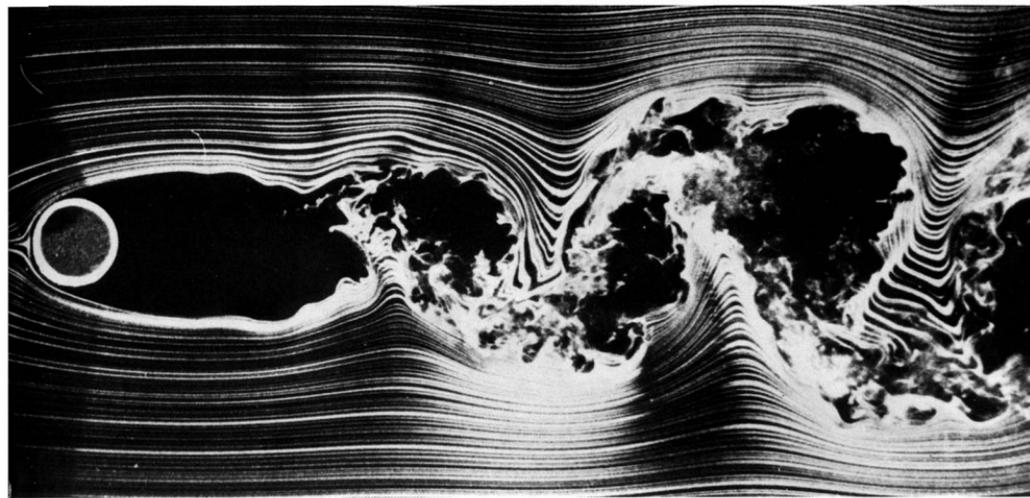
46. Обтекание кругового цилиндра при $Re = 41,0$. Эта картина примерно соответствует верхнему пределу для существования установившегося течения. Далеко вниз по потоку след уже начал совершать синусоидальные колебания. На границе ре-

циркуляционной области возникают мелкие нерегулярные утолщения, однако они затухают по мере приближения к заднему концу этой области. [Taneda, 1955]



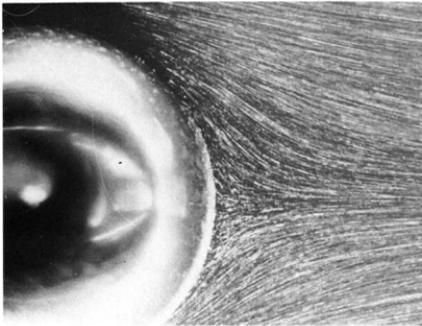
47. Обтекание кругового цилиндра при $Re = 2000$. При таком числе Рейнольдса можно уже по-настоящему говорить о пограничном слое. В передней части этот слой ламинарен, затем он отрывается и разрушается, превращаясь в турбулентный след. Точки отрыва, продвигающиеся вперед по мере возрастания числа Рейнольдса,

здесь уже достигли своего предельного положения в направлении вверх по потоку, находящегося впереди сечения максимальной толщины. Визуализация осуществляется с помощью воздушных пузырьков в воде. Фото ONERA. [Werlé, Gallon, 1972]

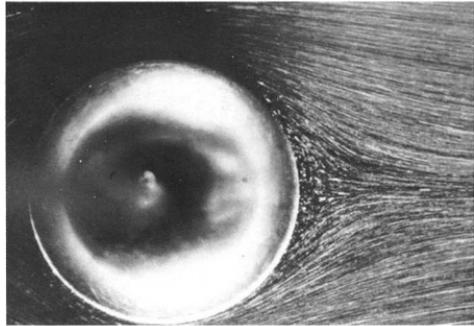


48. Обтекание кругового цилиндра при $Re = 10\,000$. При скорости, в пять раз превышающей скорость потока на предыдущем снимке, картина течения не претерпевает серьезных изменений. Коэффициент сопротивления, следовательно, остается почти по-

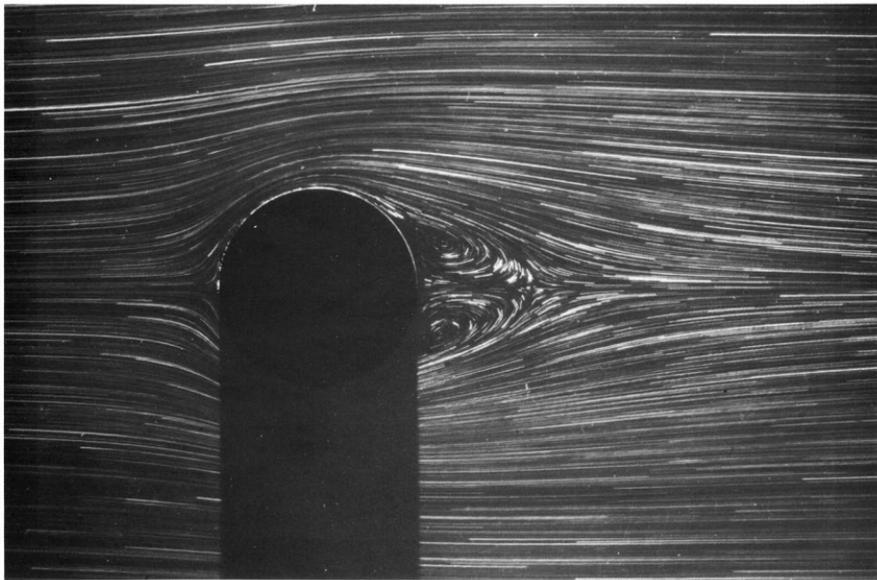
стоянным в диапазоне чисел Рейнольдса, охватываемом этими двумя снимками. Этот коэффициент снижается позднее, когда, как показано на фото 57, пограничный слой становится турбулентным уже в месте отрыва. Фото Thomas Corke, Hassan Nagib



49. Обтекание шара при $Re = 25,5$. Хотя это и не очевидно, но обычно верят, что при этом числе Рейнольдса поток становится отрывным в кормовой части тела в противоположность безотрывному течению на фото 27. Визуализация с помощью алюминиевого порошка, освещаемого в воде. [Taneda, 1956b]



50. Обтекание шара при $Re = 26,8$. При этой скорости, лишь слегка превышающей скорость течения на предыдущем снимке, поток уже явно становится отрывным в кормовой области шара; при этом образуется тонкое неподвижное вихревое кольцо. Визуализация с помощью алюминиевого порошка, освещаемого в воде. [Taneda, 1956b]

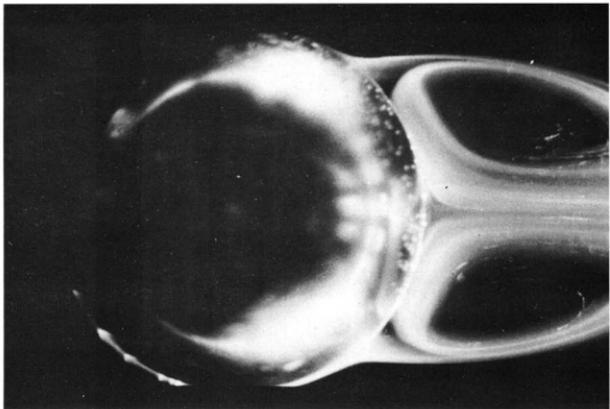


51. Обтекание шара при $Re = 56,5$. Как и на фото 8, здесь происходит равномерное падение шара вдоль оси трубы, заполненной маслом, однако в этом случае труба настолько широка, что влияние

стенки пренебрежимо мало. Магнитные опилки освещаются световым ножом, отбрасывающим тень от шара. Archives de l'Académie des Sciences de Paris. [Payard, Coutanceau, 1974]

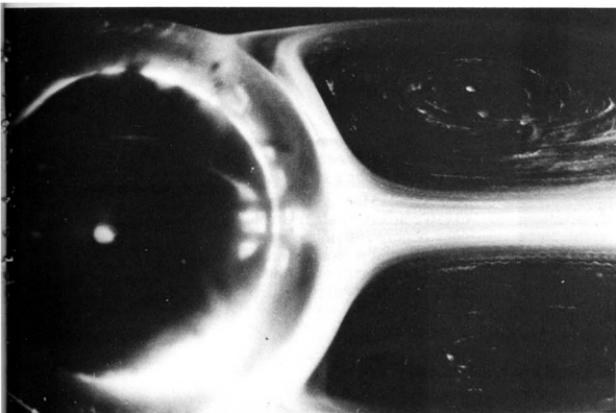
52. Обтекание шара при $Re = 104$.

При таком числе Рейнольдса рециркуляционный след простирается на целый диаметр вниз по потоку, однако он полностью сохраняет свою стационарность, как и в случае кругового цилиндра на фото 44. Визуализация осуществляется тонким слоем сгущенного молока на шаре; молоко постепенно растворяется и уносится потоком воды. [Taneda, 1956b]



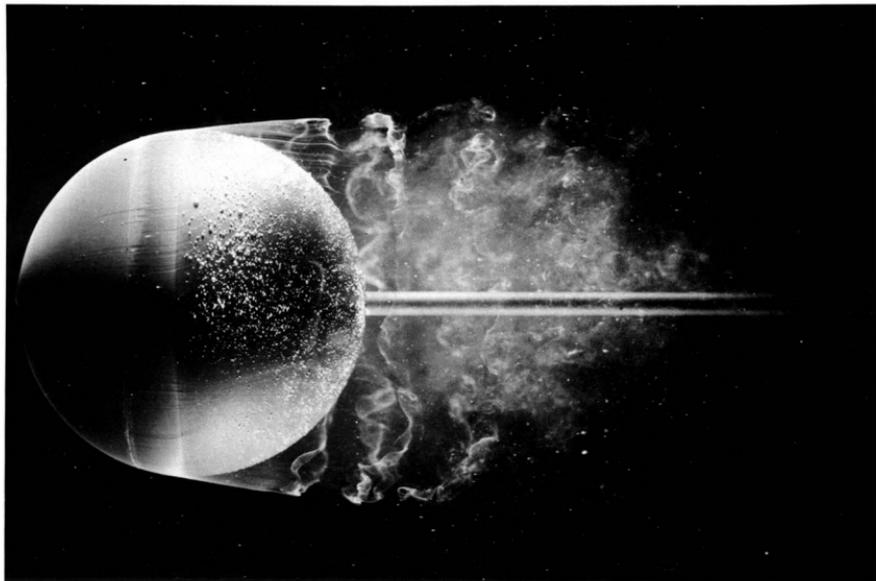
53. Обтекание шара при $Re = 118$.

В осесимметричном течении след растет медленнее, чем в плоском. Эти фотоснимки показали, что длина рециркуляционной области пропорциональна логарифму числа Рейнольдса, тогда как в случае цилиндра она растет с числом Рейнольдса линейно. Алюминиевый порошок визуализирует течение воды. [Taneda, 1956b]



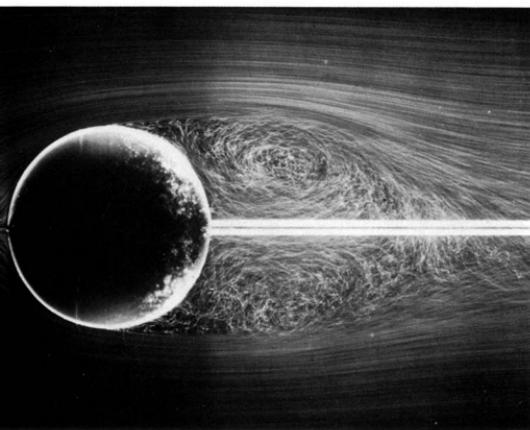
54. Обтекание шара при $Re = 202$.

Задний край рециркуляционной области за шаром начинает медленно колебаться при числе Рейнольдса, равном примерно 130, однако поток остается все же вполне ламинарным и при этой более высокой скорости. Визуализация достигается с помощью сгущенного молока в воде. [Taneda, 1956b]

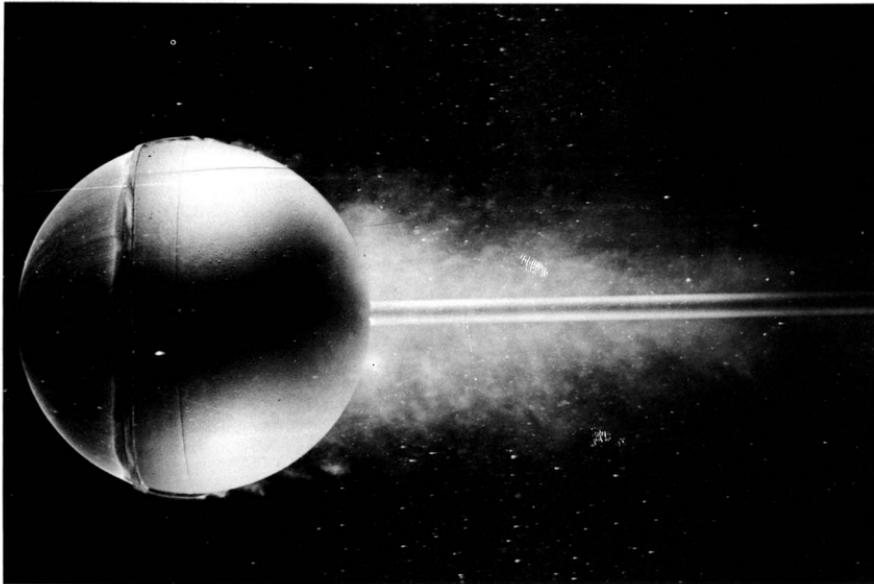


55. Мгновенная картина потока при обтекании шара при $Re = 15000$. Подкраска обнаруживает ламинарный пограничный слой, отрывающийся перед экватором, причем этот слой остается ла-

минарным на длине, почти равной радиусу. Затем слой становится неустойчивым и быстро превращается в турбулентный. Фото ONERA. [Werlé, 1980]



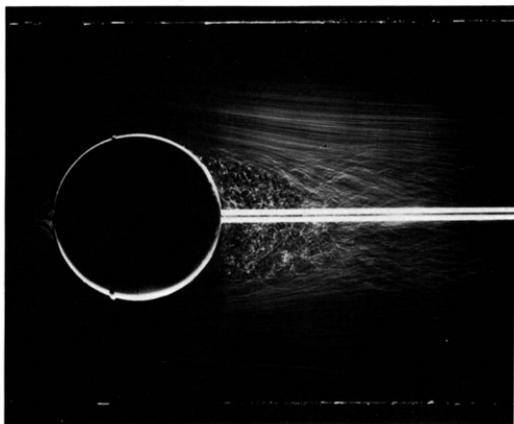
56. Осредненный поток при обтекании шара при $Re = 15000$. Длительная экспозиция при съемке воздушных пузырьков в воде показывает осредненную форму линий тока в меридиональной плоскости для течения, мгновенное фото которого приведено на предыдущем снимке. Фото ONERA, сделанное Henri Werlé

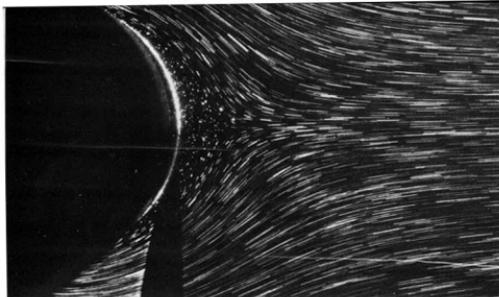


57. Мгновенная картина обтекания при $Re = 30\,000$ шара с турбулизирующей провололочкой. С помощью визуализации воздушными пузырьками в воде здесь повторен классический эксперимент Прандтля и Визельсбергера. Проволочный обруч, надевший на шар перед экватором, возмущает пограничный слой. Слой становится турбулентным и поэто-

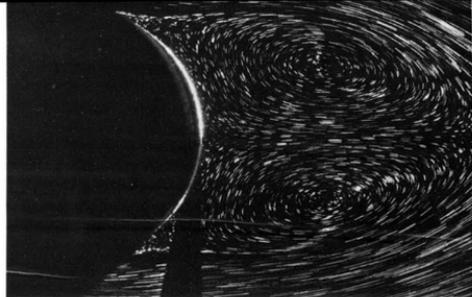
му отрывается ниже по потоку, чем если бы он был ламинарным (см. фото 55). Сопротивление при этом драматически уменьшается до значения, достигаемого на гладком шаре только при числе Рейнольдса, в десять раз превышающем существующее в потоке. Фото ONERA. [Werlé, 1980]

58. Осредненный поток при обтекании шара с турбулизирующей провололочкой при $Re = 30\,000$. Осредненный во времени снимок в меридиональной плоскости того же течения, что и на предыдущем снимке. Визуализация осуществлялась с помощью воздушных пузырьков в воде. Здесь ясно видно, как уменьшается размер следа, когда пограничный слой становится турбулентным. Фото ONERA. [Werlé, 1980]

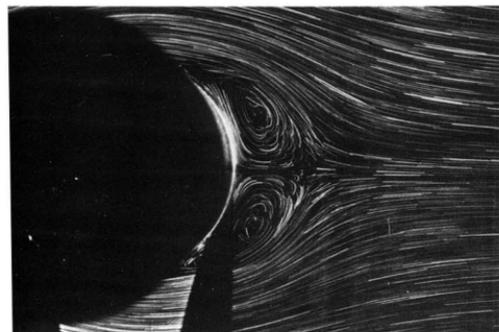




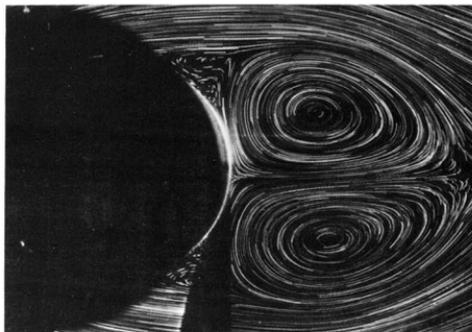
$Re = 50, U\tau/d = 0,5$



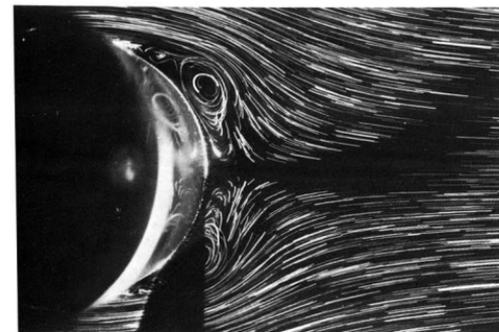
$Re = 50, U\tau/d = 2,5$



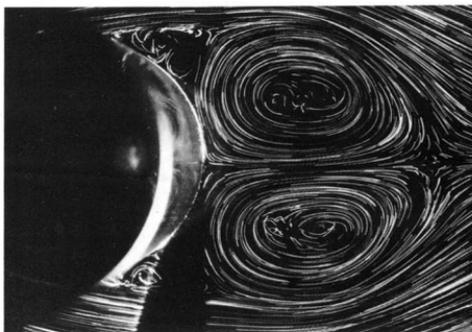
$Re = 500, U\tau/d = 1,0$



$Re = 500, U\tau/d = 3,0$



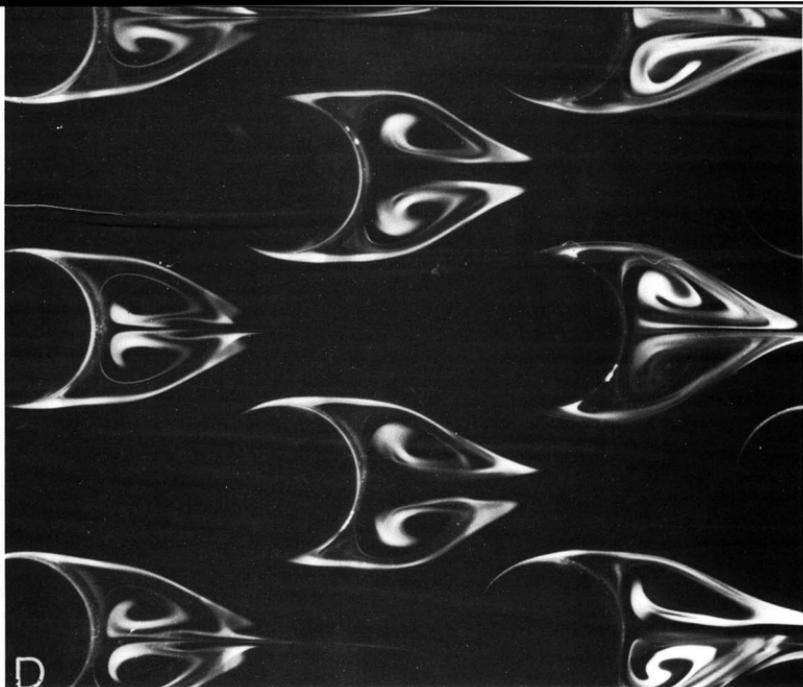
$Re = 5000, U\tau/d = 1,0$



$Re = 5000, U\tau/d = 3,0$

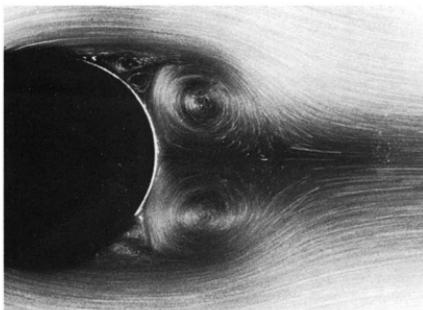
59. Внезапное начало движения кругового цилиндра. Фотокамера движется вместе с цилиндром. На снимках видна только освещенная задняя поверхность цилиндра. Затемненный угол под задней частью цилиндра получается из-за различия пока-

зателей преломления плексигласового цилиндра и масла, внутри которого цилиндр приводится в движение. Трассирующие частицы представляют собой мелкие магнитные опилки. Фото Madeleine Coutanceau, Roger Bouard



60. Внезапное начало движения шахматной решетки круговых цилиндров. Число Рейнольдса, рассчитанное по диаметру, равно 3000. Решетка продвиг-

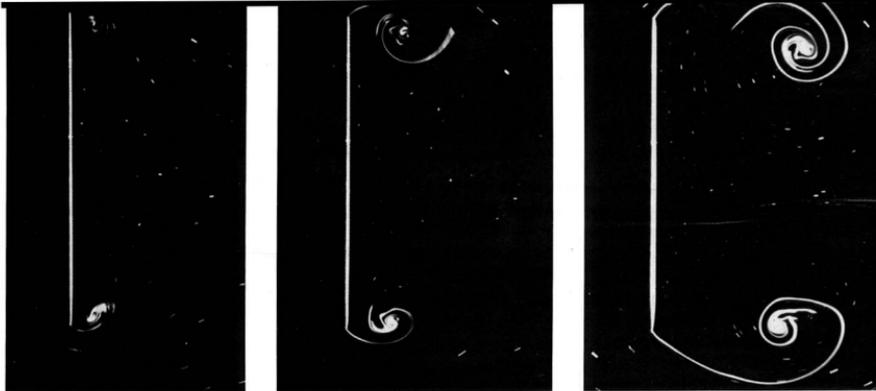
нулась примерно на десять диаметров. Фото ONERA. [Werlé, Gallon, 1973]



61. Внезапное начало движения кругового цилиндра при $Re = 1700$, $Ut/d = 1,92$. Алюминиевый порошок в воде позволяет получить иной взгляд на то движение, которое показано на фото 59. На снимке отчетливо видны пары малых вторичных вихрей, расположенных вверх по потоку от каждого из основных. [Honji, Taneda, 1969]



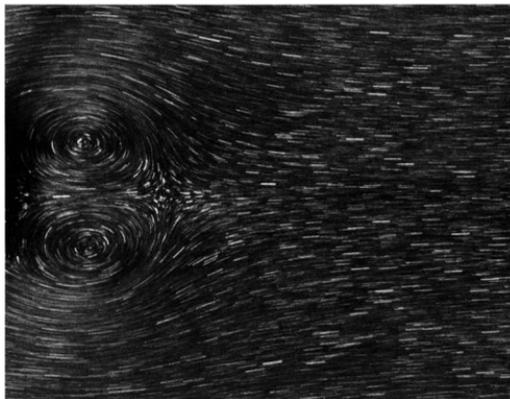
62. Внезапное начало движения кругового цилиндра при $Re = 1700$, $Ut/d = 4,05$. На этой более поздней стадии движения след уже потерял свою первоначальную симметричную форму и начинает ронять вихри в поток. [Honji, Taneda, 1969]



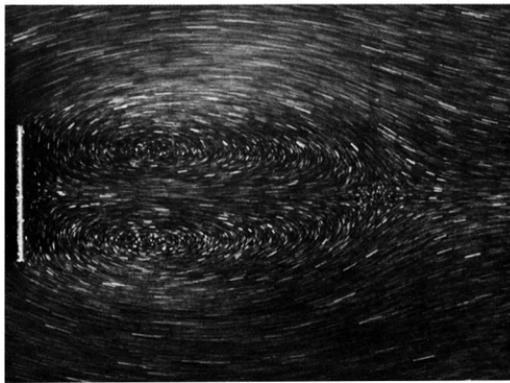
63. Внезапное начало движения плоской пластинки в направлении ее нормали. Число Рейнольдса, рассчитанное по ширине пластинки, равно 88. Белая краска, создаваемая на поверхности пластинки путем электролиза воды, обнаруживает спиральные

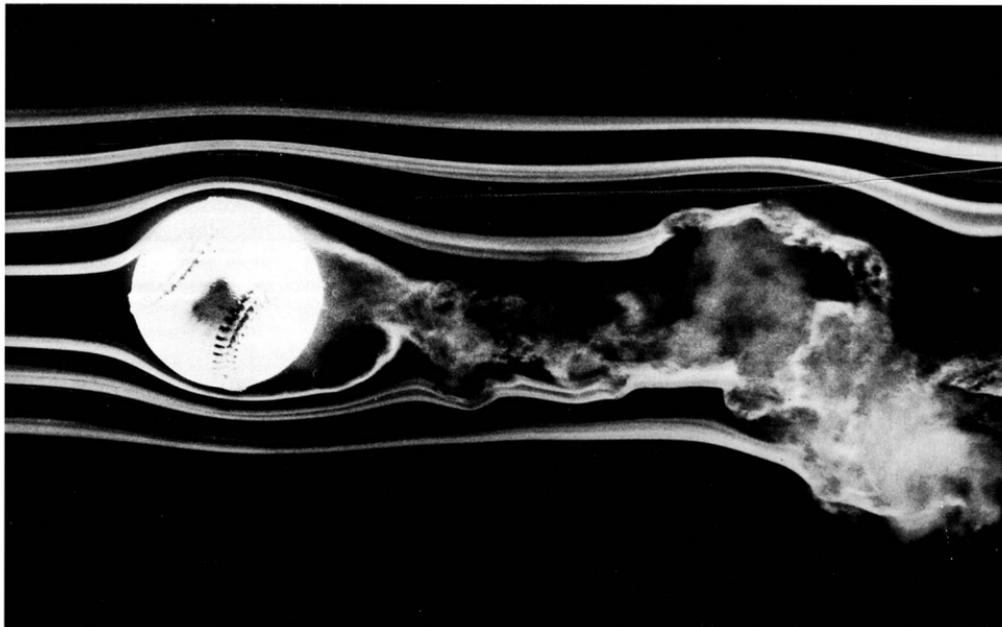
вихревые полосы, сбегаящие с каждой из кромок. Пластинка продвинулась соответственно на расстояния, равные 0,079; 0,26 и 0,93 ширины. [Taneda, Honji, 1971]

64. Внезапное начало движения плоской пластинки. Совершенно иной взгляд на то же явление, что и на фото 63, дает взвешенная в воде алюминиевая пыль. Здесь в момент, когда пластинка продвинулась на 1,45 своей ширины, при числе Рейнольдса, равном 126, видна симметричная пара неподвижных вихрей. [Taneda, Honji, 1971]



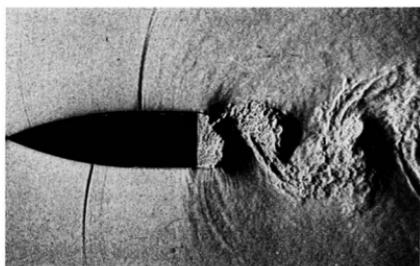
65. Внезапное начало движения плоской пластинки. Пластинка продвинулась из состояния покоя на 5,02 своей ширины. Картина течения все еще симметрична, хотя позднее она превратится в колеблющуюся вихревую дорожку. Согласно наблюдениям, длина рециркуляционной области растет пропорционально времени в степени 2/3. [Taneda, Honji, 1971]



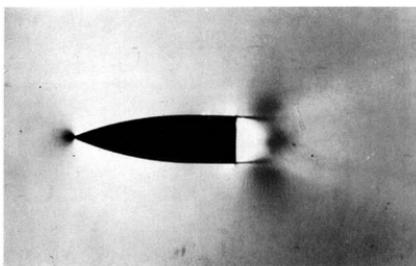


66. Вращающийся бейсбольный мяч. Покойный Ф. Н. М. Браун посвятил много лет разработке и применению дымовой визуализации в аэродинамических трубах Университета Нотр-Дам. Здесь скорость течения равна примерно 77 фут/с и мяч

вращается со скоростью 630 об/мин. Эта неопубликованная фотография аналогична нескольким другим из книги Брауна [Brown, 1971]. Фото любезно предоставлено Т. Дж. Мюллером (T. J. Mueller)

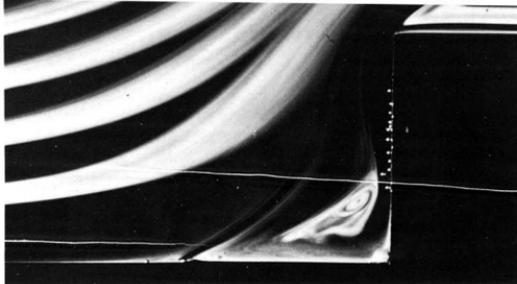


67. Колеблющийся след за профилем с затупленной задней кромкой. При числе Маха 0,6 и числе Рейнольдса 220 000 высокоскоростная киносъемка потока при его визуализации шлирен-методом позволяет видеть волны, движущиеся вверх по потоку поочередно вдоль каждой из поверхностей и порождаемые периодически колеблющимся следом. Отрыв в донной области ламинарен. [Dyment, Flodrops, Gryson, 1982]

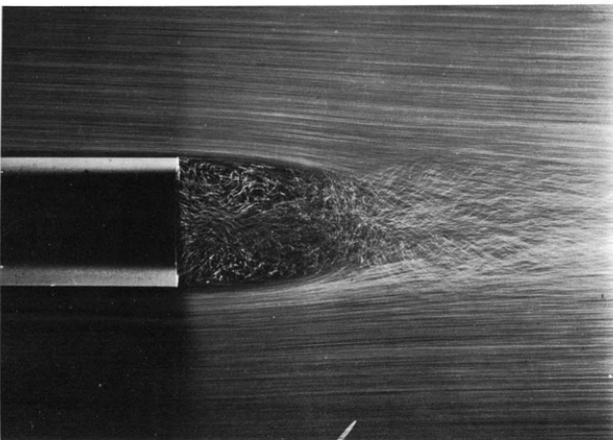


68. Осредненное течение вокруг профиля с плоской задней кромкой. Экспозиция в 1/400 с осредняет показанное на предыдущем снимке течение по двенадцати циклам, создавая тем самым совершенно иное представление о движении. [Dyment, Gryson, 1978]

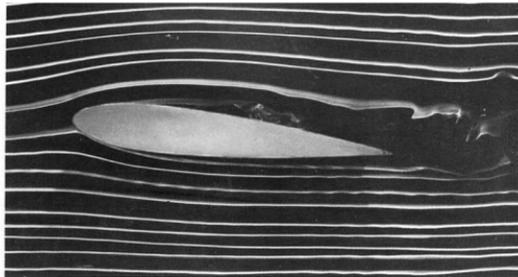
69. Ламинарный поток, набегающий на ступеньку. Как и в течениях в лотке Хил-Шоу, показанных на фото 1–5, препятствие заполняет одномолиметровый зазор между стеклянными пластинками, однако число Рейнольдса здесь равно 1000. Структура отрыва ближе к той, которая была продемонстрирована на фото 11, нежели к той, которая показана на фото 5 или 39. Линии тока визуализируются подкрашенной жидкостью. Фото ONERA. [Werlé, 1960b]



70. Осесимметричный поток, сходящий со ступеньки. При числе Рейнольдса, рассчитанном по длине тела и равном 10 000, пограничный слой в области отрыва ламинарен. Визуализация течения осуществляется с помощью воздушных пузырьков, освещаемых в воде. За ступенькой течение остается установившимся и ламинарным, превращаясь в неустановившееся и турбулентное далее вниз по потоку. Фото ONERA. [Werlé, 1974]

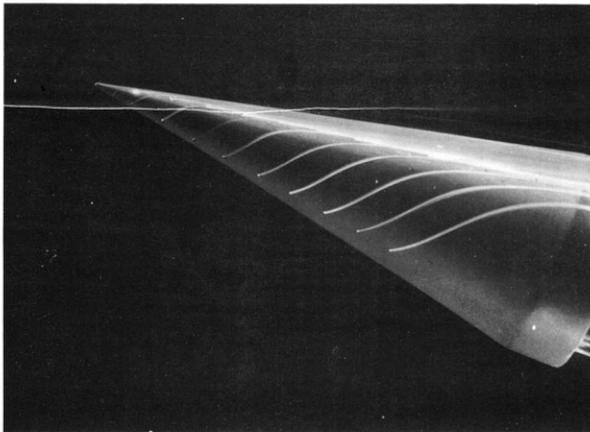


71. След за телом вращения с плоским дном. Ламинарный пограничный слой отрывается от дна, окружая ламинарную «застойную» зону. Далее вниз по потоку осуществляется переход ламинарного слоя в турбулентный след. Фото ONERA. [Werlé, 1974]

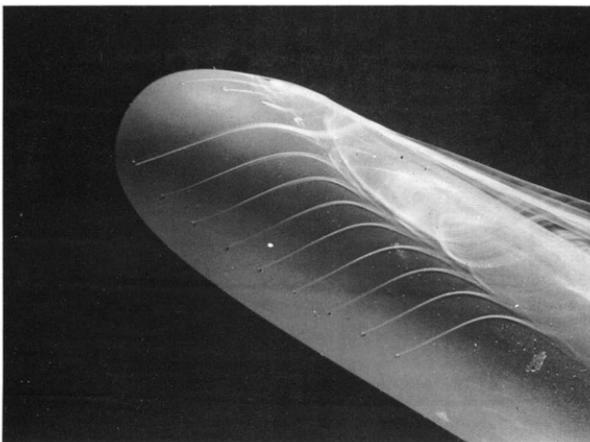


72. Симметричный профиль под углом атаки. Дым в аэродинамической трубе показывает отрыв на верхней поверхности профиля, имеющего относительную толщину 15% и установленного под углом атаки 6° , при числе Рейнольдса 20 000. Фото Peter Bradshaw

73. Конус под углом атаки. Круговой конус с полууглом раствора 12° наклонен в потоке воды под углом 16° . Число Рейнольдса, рассчитанное по длине, равно 15 000. Как видно, течение можно считать коническим. Линии тока на поверхности, прослеживаемые с помощью подкрашенной жидкости, оказываются касательными к тонкому слою ламинарного отрыва над подветренной поверхностью. Фото ONERA. [Werlé, 1962]



74. Оживальное тело Рэнкина под углом атаки. Осесимметричное тело, показанное на фото 22, наклонено здесь под углом атаки 30° к потоку воды. Линии тока на поверхности касательны к наружной границе тонкого слоя ламинарного отрыва и обратного присоединения, образующего нечто вроде подковообразного вихря, расположенного над подветренной поверхностью. Фото ONERA. [Werlé, 1962]

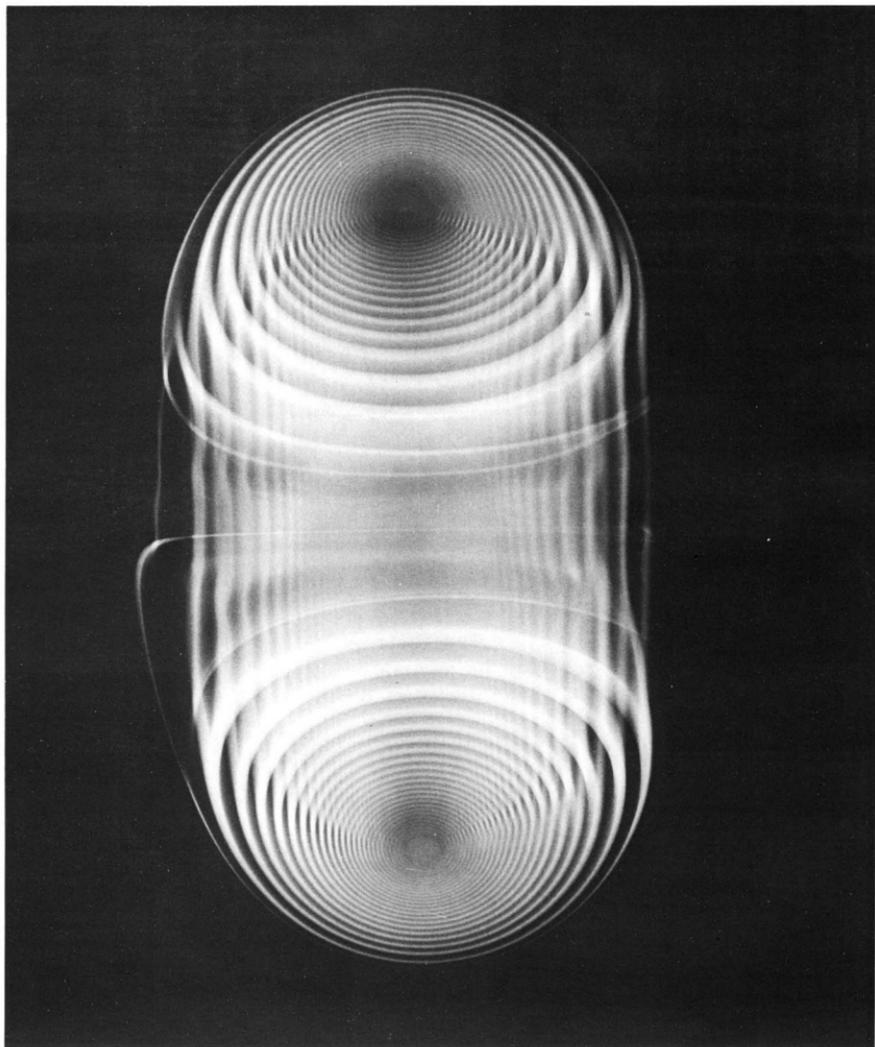


4. Вихри



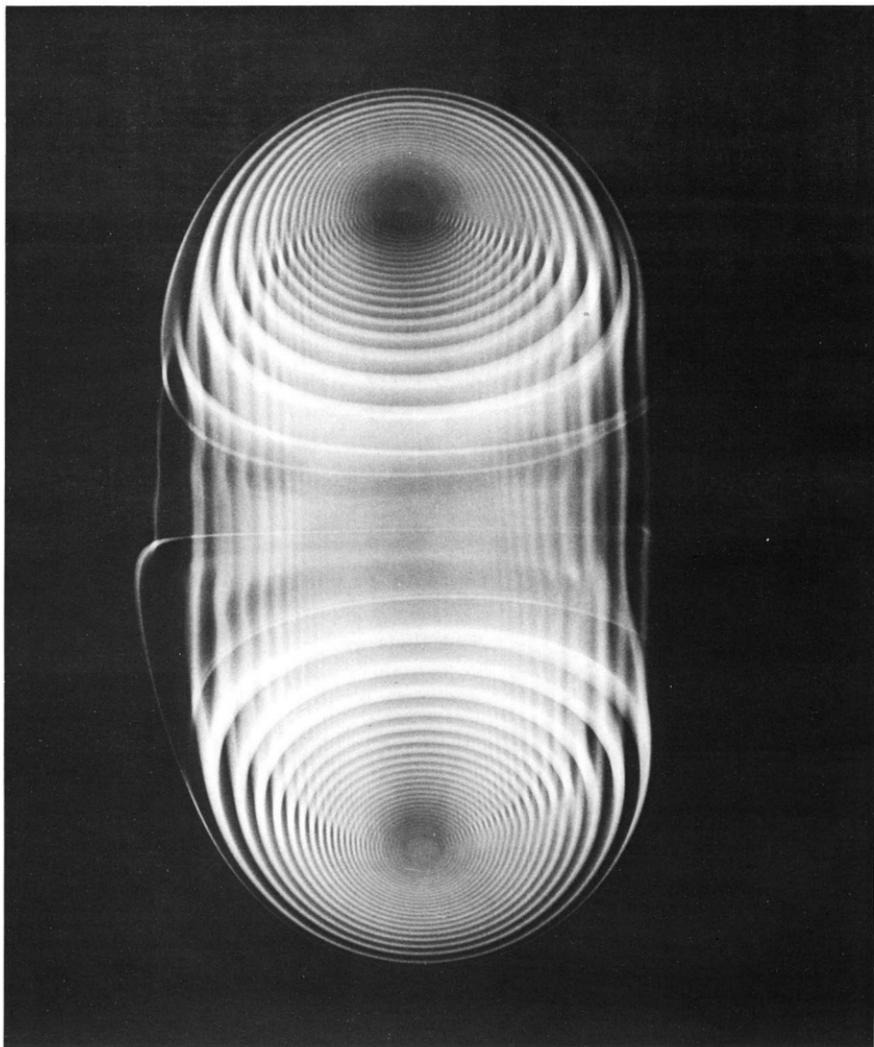
75. Вихри за вращающимся винтом. Впечатляющая картина винтовых концевых и корневых вихрей визуализирована дымом в аэродинамической трубе Университета Нотр-Дам. Поток движется со ско-

ростью 48 фут/с, винт вращается со скоростью 4080 об/мин. [Brown, 1971], любезно предоставлено Т. Дж. Мюллером (T. J. Mueller)



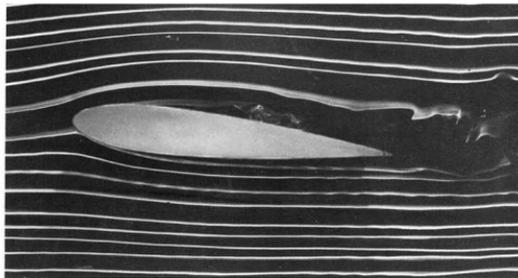
77. Структура дымового кольца. Выпуская дым в воздух через конец трубы, можно по-иному увидеть процесс, показанный на предыдущем фото. Видно, что в результате истечения получается не настоящее кольцо с замкнутой поверхностью, а ту-

го свернутая тороидальная спираль. Число Рейнольдса примерно равно 10 000. На фото 112 показано образование аналогичного кольца в воде. [Magarvey, MacLachy, 1964]



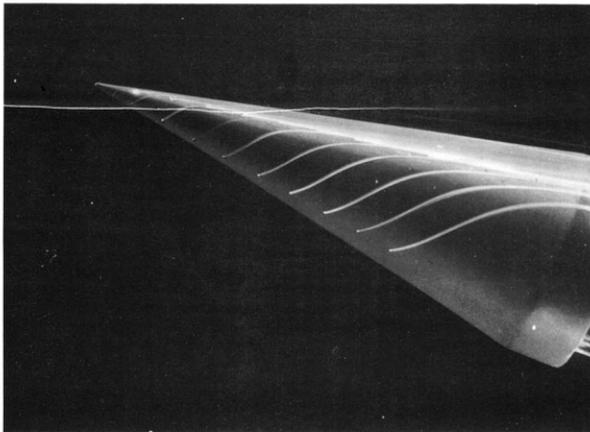
77. Структура дымового кольца. Выпуская дым в воздух через конец трубы, можно по-иному увидеть процесс, показанный на предыдущем фото. Видно, что в результате истечения получается не настоящее кольцо с замкнутой поверхностью, а ту-

го свернутая тороидальная спираль. Число Рейнольдса примерно равно 10000. На фото 112 показано образование аналогичного кольца в воде. [Magarvey, MacLachy, 1964]

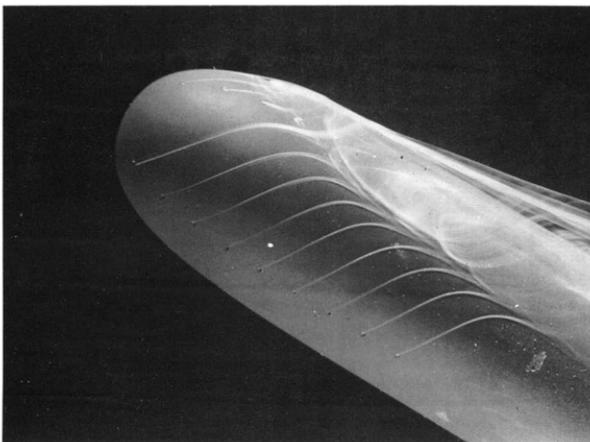


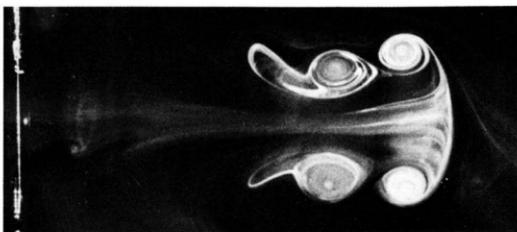
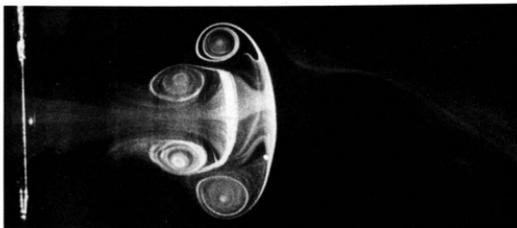
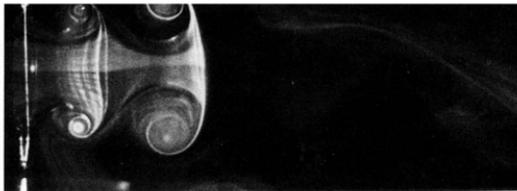
72. Симметричный профиль под углом атаки. Дым в аэродинамической трубе показывает отрыв на верхней поверхности профиля, имеющего относительную толщину 15% и установленного под углом атаки 6° , при числе Рейнольдса 20 000. Фото Peter Bradshaw

73. Конус под углом атаки. Круговой конус с полууглом раствора 12° наклонен в потоке воды под углом 16° . Число Рейнольдса, рассчитанное по длине, равно 15 000. Как видно, течение можно считать коническим. Линии тока на поверхности, прослеживаемые с помощью подкрашенной жидкости, оказываются касательными к тонкому слою ламинарного отрыва над подветренной поверхностью. Фото ONERA. [Werlé, 1962]

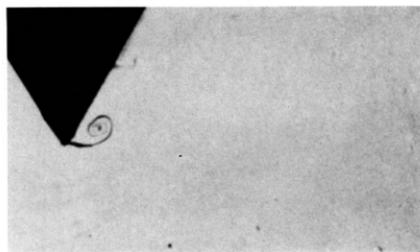


74. Оживальное тело Рэнкина под углом атаки. Осесимметричное тело, показанное на фото 22, наклонено здесь под углом атаки 30° к потоку воды. Линии тока на поверхности касательны к наружной границе тонкого слоя ламинарного отрыва и обратного присоединения, образующего нечто вроде подковообразного вихря, расположенного над подветренной поверхностью. Фото ONERA. [Werlé, 1962]

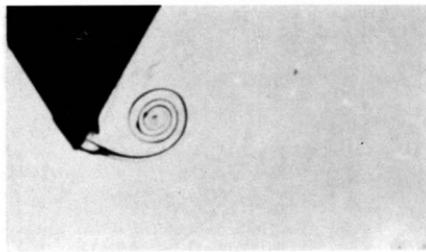




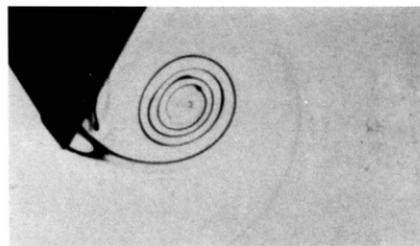
79. Чехарда двух вихревых колец. Два последовательных выхлопа воздуха выбрасывались через отверстие диаметром 8 см поршнем, приводимым в движение ударами двух маятников. Визуализация течения получалась при помощи дымовой проволоочки, протянутой поперек отверстия и видной в левых частях снимков. При данном числе Рейнольдса, рассчитанном по диаметру отверстия и примерно равном 1600, второе кольцо движется быстрее, так как находится в индуцированном первым кольцом поле; на третьем фотоснимке второе кольцо уже проскальзывает сквозь первое. Затем процесс повторяется, и на последнем снимке уже первое кольцо проскальзывает сквозь второе. [Yamada, Matsui, 1978]



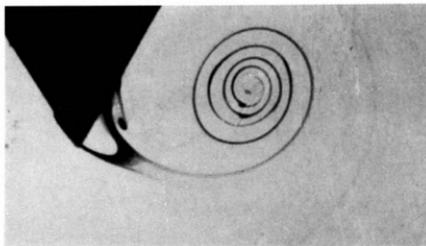
$t = 1,0 \text{ c}$



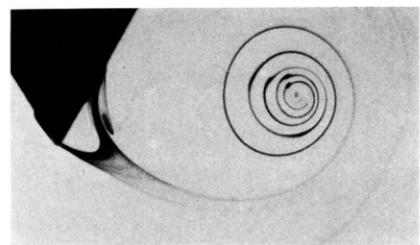
$3,0 \text{ c}$



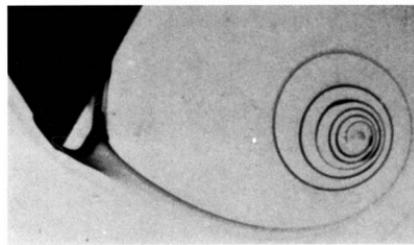
$t = 5,0 \text{ c}$



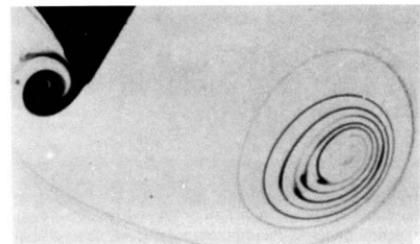
$7,0 \text{ c}$



$t = 9,0 \text{ c}$

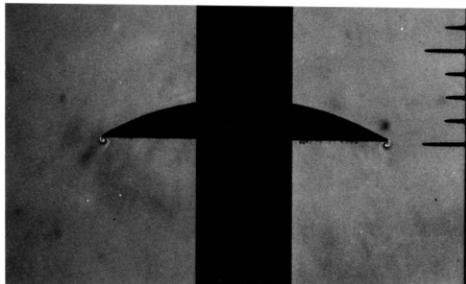


$11,0 \text{ c}$

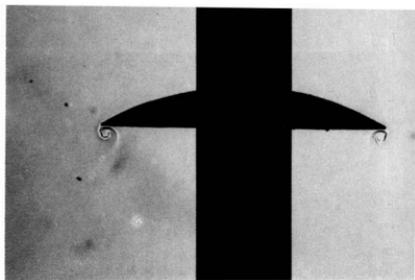


$t = 13,0 \text{ c}$

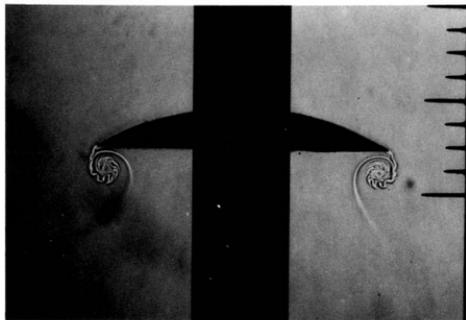
80. Вихрь на клине, образующийся при начале движения. Поршень выталкивает воду с почти постоянной скоростью в направлении нормали к оси клина с полууглом раствора 30° . Краска, обладающая нейтральной плавучестью, впрыскивается в воду через малые отверстия на поверхности клина. Характерное число Рейнольдса имеет порядок 1000. Через 12,5 с поршень останавливается, создавая второй, остановочный, вихрь, видный на последнем снимке. [Pullin, Perry, 1980]



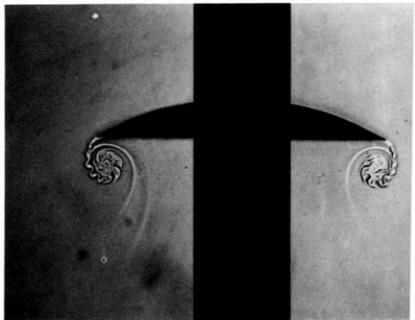
$t = 1,05 \text{ мс}, v = 5,5 \text{ фут/с}$



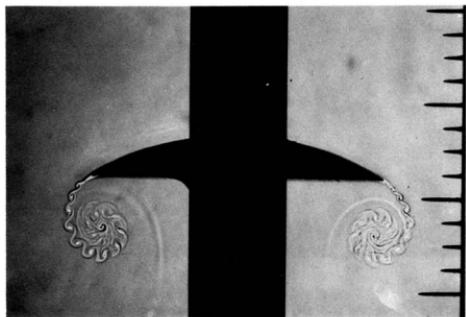
$t = 2,14 \text{ мс}, v = 11,1 \text{ фут/с}$



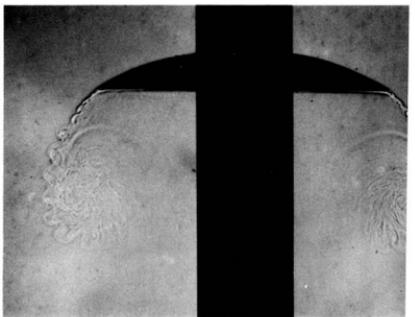
$t = 3,22 \text{ мс}, v = 16,9 \text{ фут/с}$



$t = 4,30 \text{ мс}, v = 21,0 \text{ фут/с}$



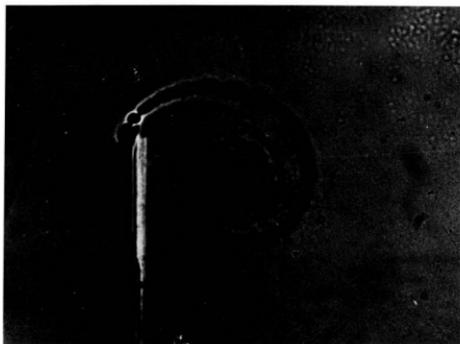
$t = 6,53 \text{ мс}, v = 24,0 \text{ фут/с}$



$t = 10,66 \text{ мс}, v = 24,0 \text{ фут/с}$

81. Развитие вихрей на ускоренно движущейся пластинке. Сделанные искровым методом теневые фотографии демонстрируют развитие течения около квадратной пластинки со стороной 3 дюйма, ускоренно движущейся в воздухе из состояния покоя вплоть до достижения скорости 24 фут/с. Острая кромка пластинки располагается сначала напротив первого ребра из ряда ребер, отстоящих одно от другого на 1/4 дюйма. Пластинка в действительности движется в вертикальном направлении.

Визуализация течения осуществляется путем нанесения узкой полоски бензина на середине пластинки из бальзового дерева, так что при ускорении пластинки бензиновые пары втягиваются внутрь вихревой пелены. Различие плотностей пара и воздуха делает видимым движение разделяющей их границы. Были приняты специальные меры к обеспечению того, чтобы волнообразные движения, наблюдаемые в вихревой пелене, не были связаны с колебаниями самой модели. [Pierce, 1961]

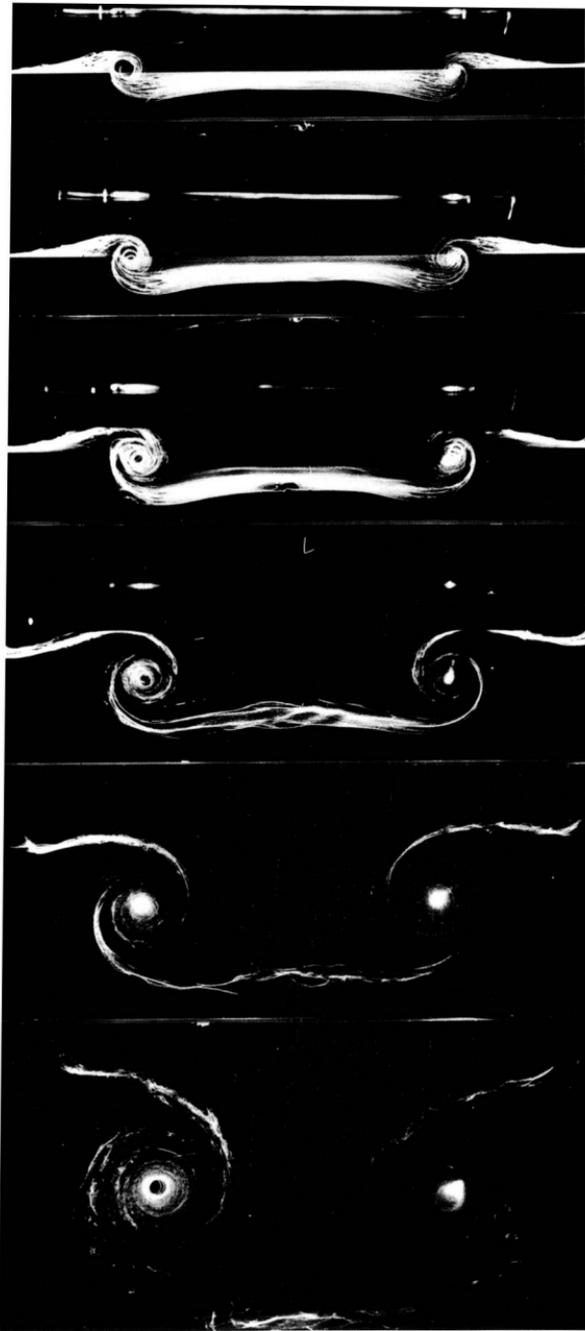


82. Вихрь от клина в ударной трубе. Эта шликерен-фотография демонстрирует вихрь, сбегающий спиралью с вершины тонкого клина после того, как воздух приводится в движение по нормали к срединной плоскости клина слабой ударной волной. Волна находится в момент фотографирования правее клина и не видна на снимке. Другие фотографии показывают, что картина течения «коническая» или «псевдостационарная», т. е. она остается подобной самой себе, но ее размер растет пропорционально времени. Фото Walker Bleakney

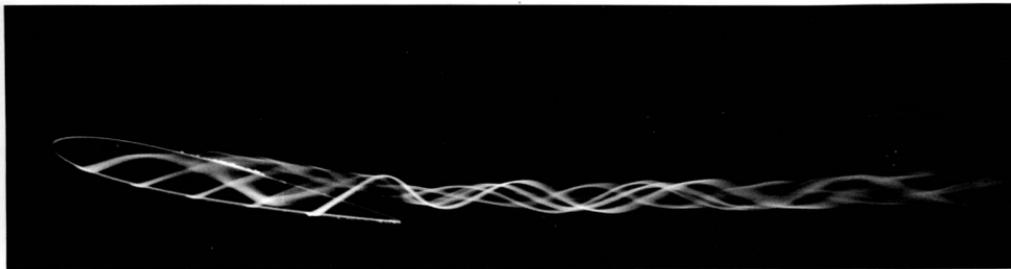


83. Распределение плотности в вихре от клина. Совершенно иная картина того же явления, что и на фото 82, получается на приводимой здесь интерферограмме в полосах бесконечной ширины, показывающей линии постоянной плотности. Порази-

тельной особенностью снимка является почти идеальное круговое распределение плотности относительно центра вихря, продолжающееся практически до самого клина. Фото Walker Bleakney

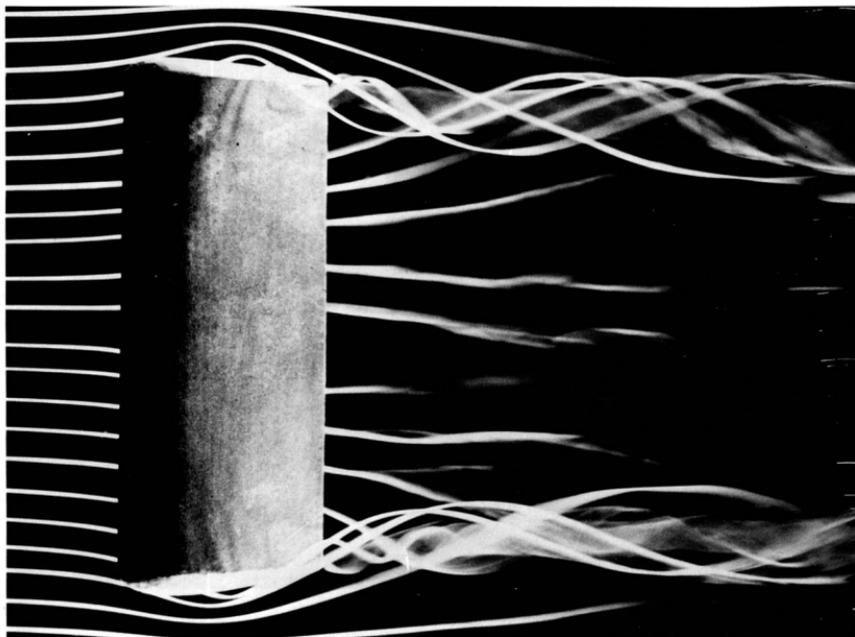


84. Сечения вихревой пелены за прямоугольным крылом. След, сворачивающийся за прямоугольным крылом под углом атаки 9° , показан на этих снимках на расстояниях от задней кромки, равных соответственно 1,0; 1,6; 2,9; 5,5; 11,2 и 21 длинам хорды. Крыло имело профиль Clark Y, относительную толщину 10% , хорду длиной 0,125 м и размах 0,3 м со срезанными по прямоугольнику торцами. Крыло, подвешенное на тонких проволочках, протаскивалось в воде. Визуализация следа осуществлялась с помощью водородных пузырьков от проволоки толщиной 30 мкм, расположенной непосредственно за задней кромкой; пузырьки освещались ксеноновыми лампами. Вихри отрываются от поверхности крыла сразу же за серединой хорды. Число Рейнольдса, рассчитанное по хорде, равно 100 000. Вихревая пелена первоначально турбулентна, но дальше вниз по потоку вновь становится ламинарной. Фото Н. Bippes



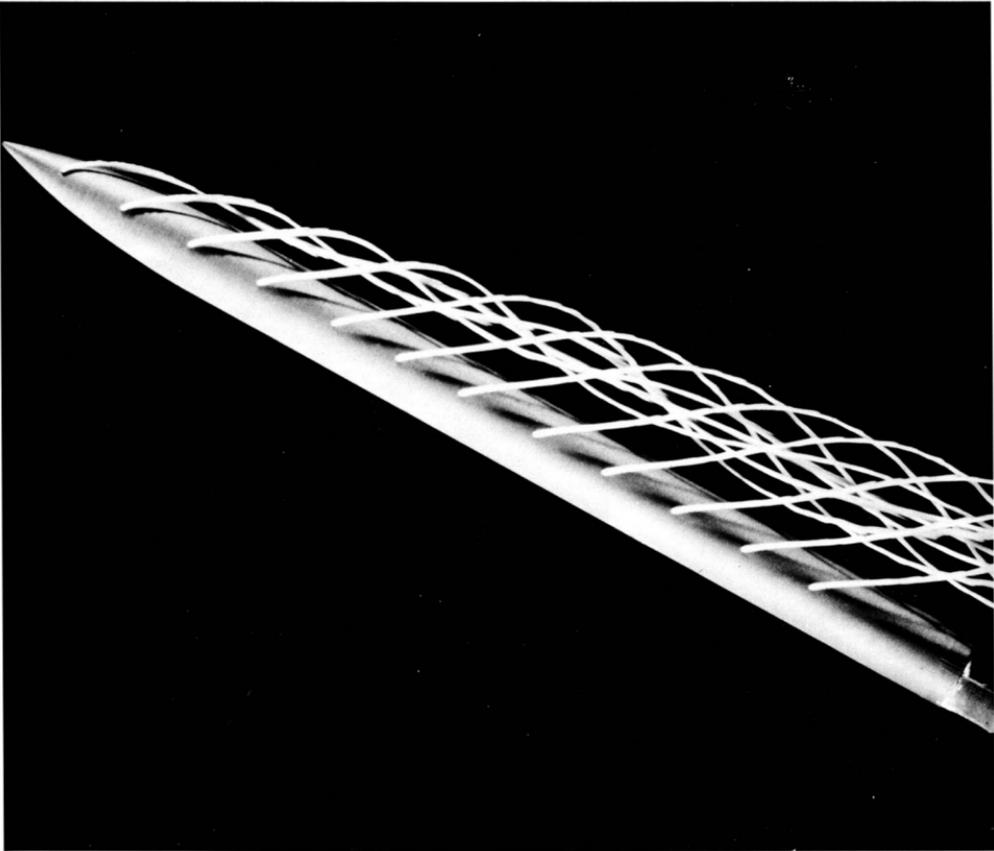
85. Концевой вихрь от торца прямоугольного крыла. При угле атаки $12,5^\circ$ срыв вихря происходит на значительном расстоянии вверх по потоку от задней кромки. Крыло имеет профиль NACA 0012 и удлинение, равное 4. При данном числе Рейнольд-

са, равном 10 000, след ламинарен в отличие от течения на фото 84. Визуализация осуществляется с помощью подкрашенной жидкости в воде. Фото ONERA. [Werlé, 1974]



86. Концевые вихри, сбегające с прямоугольного крыла. Благодаря применению подсоса при угле атаки в 24° по всей поверхности крыла поток остается присоединенным в отличие от течения на предыдущем снимке. Поэтому центры вихревых

ядер сходят с задней кромки на концах крыла. Модель сделана из перфорированного металла, покрытого промокательной бумагой, и испытывалась в дымовой аэродинамической трубе при числе Рейнольдса 100 000. [Head, 1982]



87. Присоединенная пара вихрей за тонким телом под углом атаки. Длинный цилиндр с носовой частью оживальной формы наклонен под углом 30° к потоку воды, движущемуся со скоростью 4 см/с. При этом угле атаки на подветренной стороне тела образуется симметричная пара вихрей.

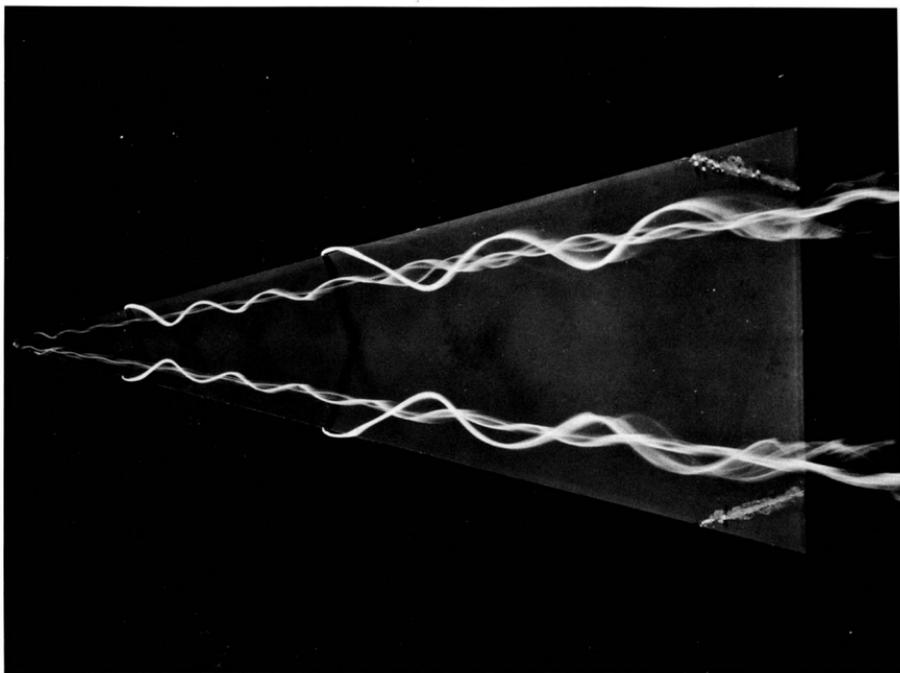
Подкрашенная жидкость, вытекающая под небольшим избыточным давлением через отверстия на поверхности диаметром 0,3 мм, завивается спирально вокруг ядра ближайшего из вихрей. Число Рейнольдса, рассчитанное по диаметру 1 см, равно 400. [Fiechter, 1969]

88. Вихри, сходящие с тела в дозвуковом потоке. Длинное тело, состоящее из цилиндра с конической головкой, обтекается в аэродинамической трубе под углом атаки 30° при числе Маха 0,4. Число Рейнольдса, рассчитанное по диаметру, равно 80 000. Симметричная пара вихрей образуется на подветренной стороне передней части тела, как и на предыдущем снимке. Далее вниз по потоку вихри поочередно срываются и ведут себя в плоскостях, нормальных к оси тела, наподобие вихревой дорожки Кармана (см. фото 94–98). Фото К. D. Thomson



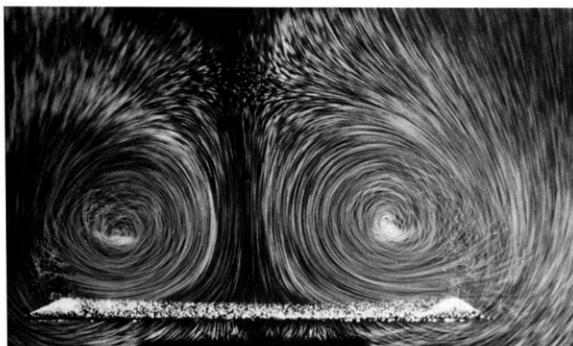
89. Вихри, сходящие с тела в сверхзвуковом потоке. Здесь угол атаки равен 35° , а число Маха свободного потока равно 1,6, так что компонента числа Маха, нормальная к оси тела, равна 0,92. Поэтому в подветренной области головная ударная волна вниз по потоку отодвигается все дальше от цилиндра. Слабая ударная волна отходит от линии сопряжения конуса с цилиндром. Другие ударные волны появляются между задней кромкой тела и рядом поочередно сходящих с нее вихрей. Фото К. D. Thomson



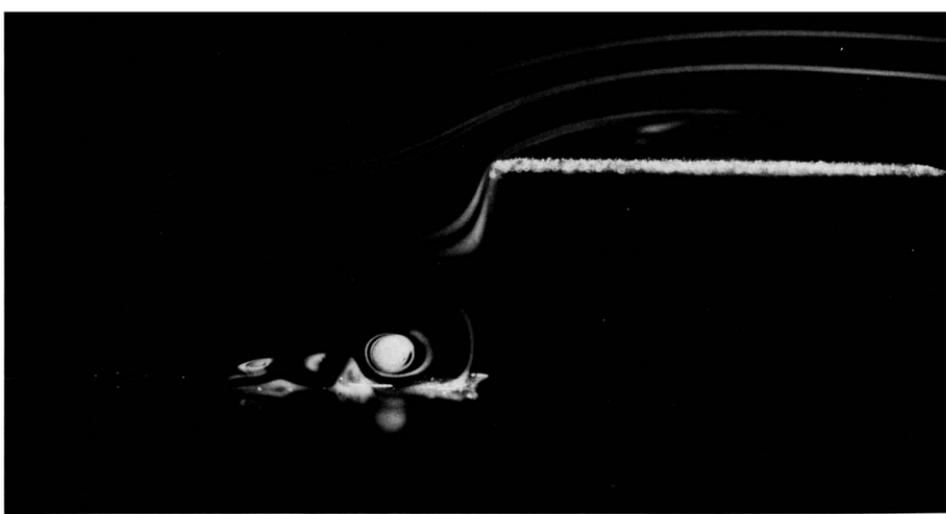


90. Вихри над треугольным крылом под углом атаки. Линии подкрашенной жидкости в воде демонстрируют симметричную пару вихрей за тонким крылом с полууглом раствора 15° под углом атаки 20° . Число Рейнольдса, рассчитанное по хорде,

равно 20000. Несмотря на то что число Маха очень мало, поле течения над большей частью крыла коническое, так что все характеристики течения постоянны вдоль лучей, идущих от вершины. Фото ONERA. [Werlé, 1963]



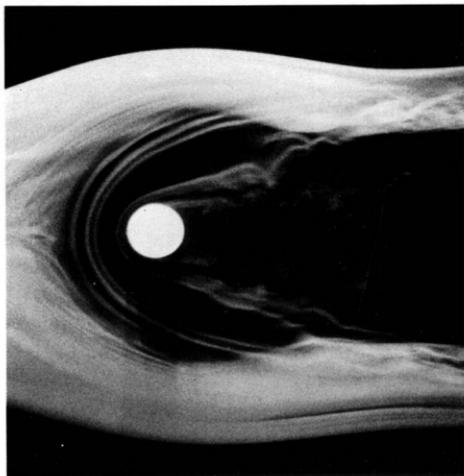
91. Сечение вихрей над треугольным крылом. Мелкие пузырьки воздуха в воде позволяют видеть вихревую пару течения, показанного на предыдущем снимке, в сечении, проходящем через заднюю кромку крыла. Фото ONERA. [Werlé, 1963]



92. Подковообразные вихри перед цилиндром в пограничном слое. Ламинарный пограничный слой на плоской пластинке отрывается впереди короткого кругового цилиндра, высота которого примерно в три раза больше толщины пограничного слоя. Завихренность в пограничном слое концентрируется в трех вихрях, загибающихся вокруг передней части цилиндра. Ближе к пластинке, в зоне возвратного течения, образуются два вихря противоположного знака, они отражаются в пластинке. Число Рейнольдса, рассчитанное по диаметру ци-

линдра, равно 5000. Для визуализации применяются струйки дыма в воздухе, освещаемые световым ножом в плоскости симметрии. Таким способом выявляются три критические точки потока на пластинке, три точки обратного присоединения потока, а также две свободные критические точки, находящиеся в потоке между вихрями. Другое изображение этого же течения фигурирует в качестве фронтисписа в книге Твейтса «Incompressible Aerodynamics». Фото Е. Р. Sutton и Cambridge University Engineering Department

93. Подковообразные вихри перед цилиндром в пограничном слое. На этом снимке, демонстрирующем вид в плане, толщина набегающего пограничного слоя Блазиуса, как и на предыдущем снимке, составляет одну треть диаметра цилиндра, а рассчитанное по диаметру число Рейнольдса равно 4000, однако высота цилиндра равна не половине диаметра, а двум диаметрам. Визуализация подковообразных вихрей осуществляется при помощи дымовой пелены, вводимой в пограничный слой выше по потоку. Фото Sadatoshi Taneda





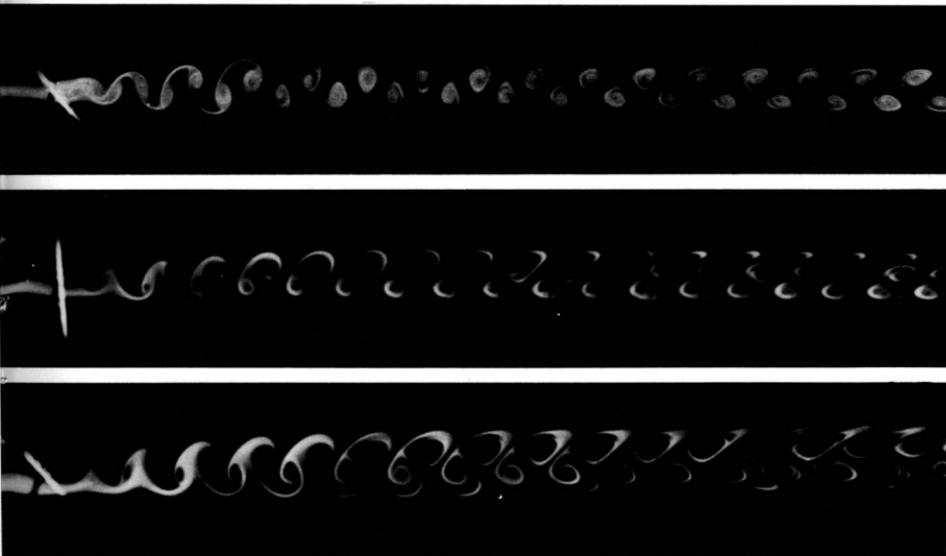
94. Вихревая дорожка Кармана за круговым цилиндром при $Re = 140$. Вода обтекает цилиндр диаметром 1 см со скоростью 1,4 см/с. Визуализация движения осуществляется так: частицы метаются белым коллоидным дымом, создаваемым элек-

тролитическим способом и освещаются световым ножом. Видно, что по мере продвижения вниз по потоку на несколько диаметров ширина вихревой пелены возрастает. Фото Sadatoshi Taneda



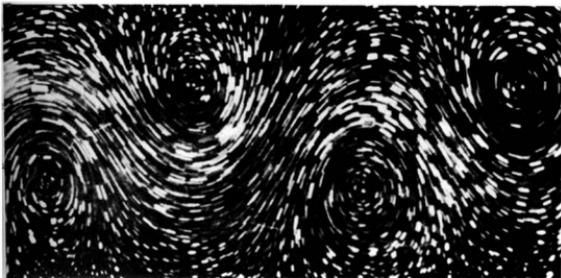
95. Вихревая дорожка Кармана за круговым цилиндром при $Re = 200$. Этот снимок, сделанный на другой жидкости (и в другой стране), оказался соответствующим такому моменту времени, что картина течения обладает замечательным сходством с картиной, представленной на предыдущем снимке. Течение происходит в аэродинамической трубе малой турбулентности; вверх по потоку от цилиндра вводится тонкая пелена табачного дыма. Фото Gary Koopman

96. Вихревая дорожка Кармана за круговым цилиндром при $Re = 105$. Расширяющаяся сперва спутная струя, показанная на двух предыдущих снимках, развивается в два параллельных ряда шахматно расположенных вихрей. Теория Кармана, построенная без учета вязкости, показывает, что такая дорожка устойчива при отношении ее ширины к продольному расстоянию между рядами, равном 0,28. Визуализация движения в воде осуществляется электролитическим способом. Фото Sadatoshi Tameda

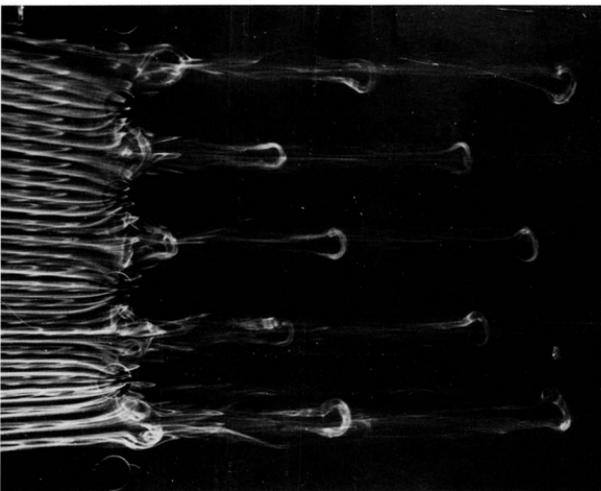


97. Дымовые струйки в вихревой дорожке на различных уровнях. Струйки дыма в воздухе при числе Рейнольдса 100 демонстрируют оба сдвиговых

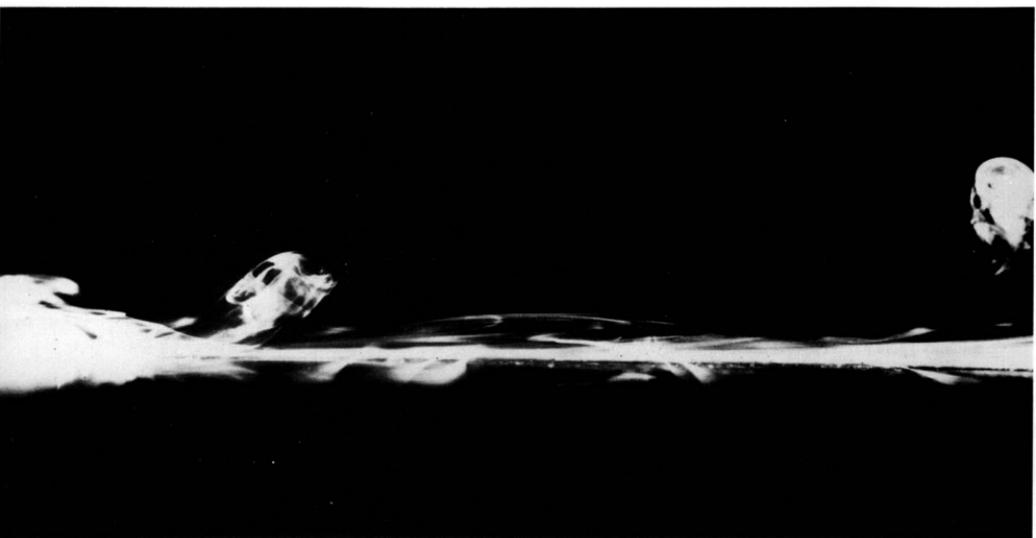
слоя (верхний снимок), только один сдвиговый слой (средний снимок) и безвихревой поток под следом (нижний снимок). [Zdravkovich, 1969]



98. Вихри Кармана в абсолютном движении. Камера движется здесь вместе с вихрями, а не с цилиндром. Структура линий тока весьма напоминает картину невязкого течения, рассчитанную Карманом. Визуализация потока осуществляется с помощью частиц, плавающих на воде. Фото R. Wille, снимок взят из статьи [Werlé, 1973]. Воспроизведено с соответствующего разрешения из Annual Review of Fluid Mecha. 8, Vol. 5, © 1973 by Annual Reviews Inc.

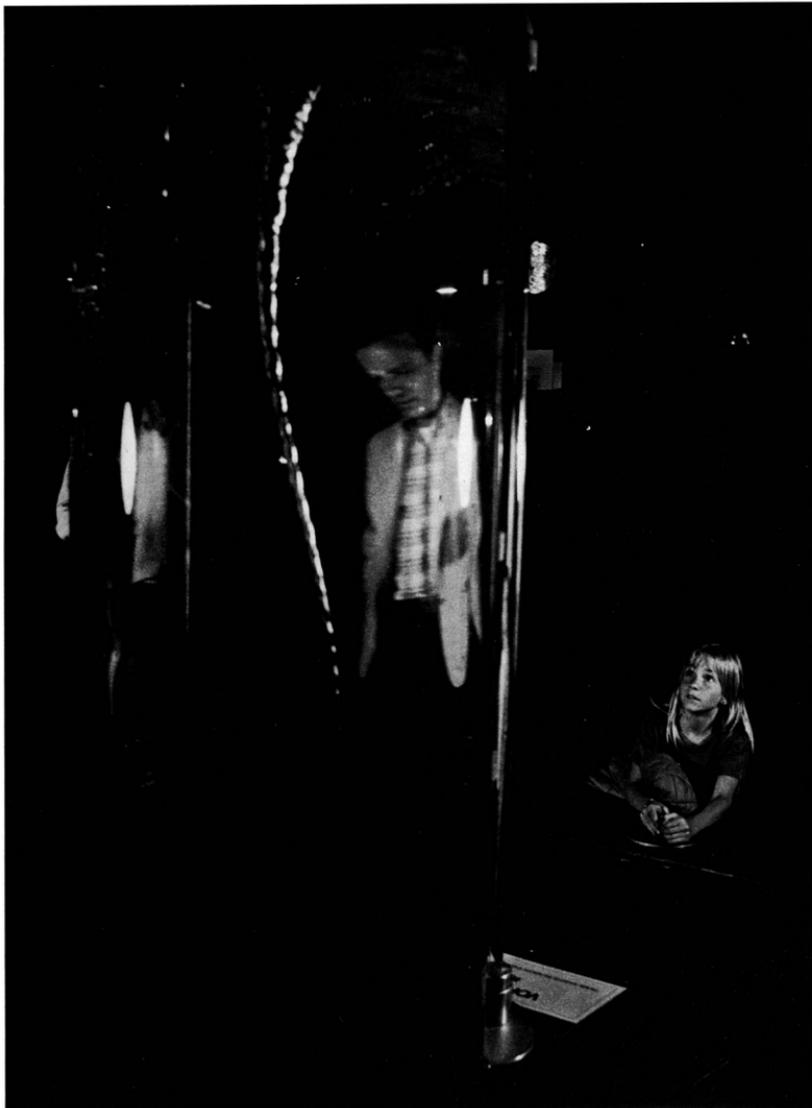


99. Подковообразные вихри в ламинарном пограничном слое, вид в плане. Здесь видно, как ламинарный пограничный слой в дымовой аэродинамической трубе протекает над рядом отверстий, через которые осуществляется отсос. При меньших расходах отсасываемой жидкости вниз по потоку за каждым отверстием устанавливается пара противоположно вращающихся вихрей и течение остается установившимся. При более сильном отсосе, как изображено на этом снимке, вихревые петли подковообразной формы периодически срываются с поверхности и сносятся вниз по потоку. Фото Peter Bradshaw и Aerodynamics Division, National Physical Laboratory



100. Подковообразные вихри в ламинарном пограничном слое, вид сбоку. Сбоку видно, как вихревые петли, показанные на предыдущем снимке, по мере своего продвижения вниз по потоку подни-

маются значительно выше границы пограничного слоя. Фото Peter Bradshaw и Aerodynamics Division, National Physical Laboratory



101. Инерционные волны на вихре в сливе ванны. На этой демонстрационной установке, имеющейся в Эксплораториуме в Сан-Франциско и созданной Дугом Холлисом, вода впрыскивается по касательной к стенке в верхней части бака и выпускается в его нижней части, причем расход регулируется

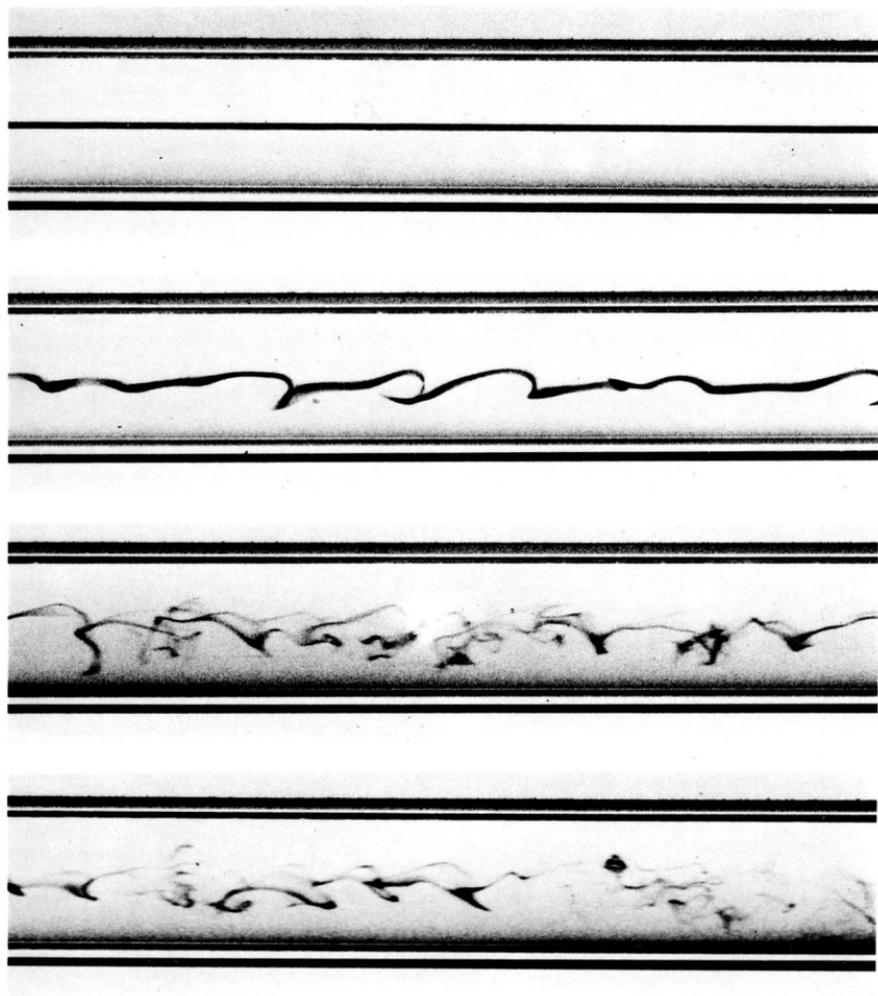
девочкой, видной на снимке справа. На воздушном ядре поверхности вихря, знакомого нам по наблюдению слива ванны, обнаруживаются расширения и сужения, являющиеся результатом действия инерционных волн. Фото Nancy Rodger

5. Неустойчивость



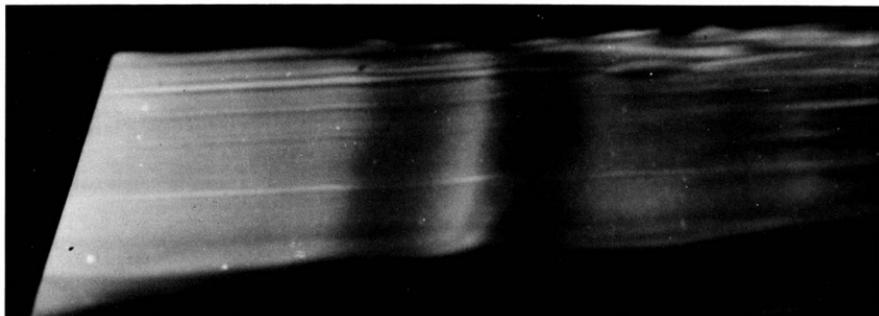
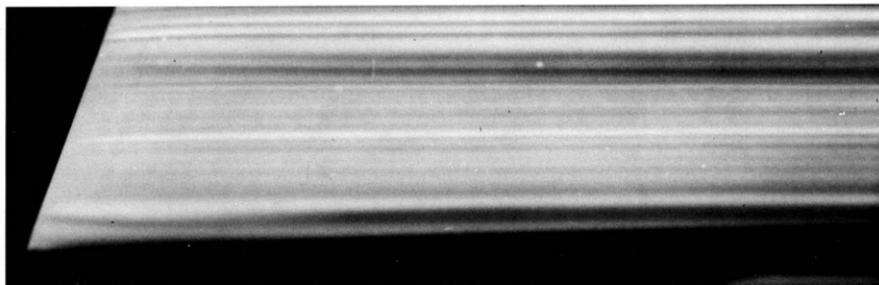
102. Неустойчивость осесимметричной струи. Ламинарный поток воздуха вытекает из круглой трубы при числе Рейнольдса 10 000 и визуализируется с помощью дымовой проволочки. Во внешней области струи развиваются осесимметричные

колебания, затем эта область струи сворачивается в вихревые кольца, после чего струя внезапно становится турбулентной. Фото Robert Drubka, Hassan Nagib



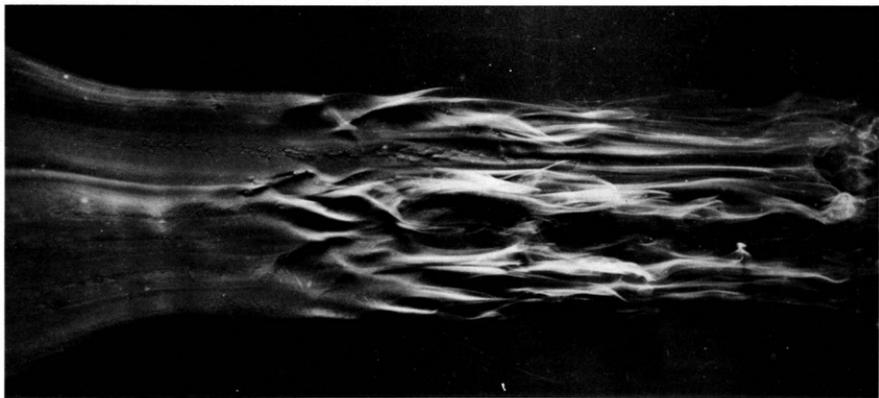
103. Повторение эксперимента Рейнольдса с краской. Знаменитое исследование устойчивости течения в трубе, проведенное Осборном Рейнольдсом в 1883 г., было документировано не фотографиями, а рисунками. Однако в Манчестерском университете сохранилась сама экспериментальная установка. Воспользовавшись ею столетием позже, Йоханнесен и Лоу сделали приводимую здесь серию фотографий. Струйка подкрашенной воды,

вводимая в ламинарный поток во входной части, имеющей колоколообразную форму, остается невозмущенной по всей длине стеклянной трубки. На втором снимке, когда скорость возросла, уже виден переход; на двух последних снимках показано вполне развитое турбулентное течение. Из-за уличного движения в современном Манчестере критическое число Рейнольдса оказалось ниже значения 13000, которое получил сам Рейнольдс.



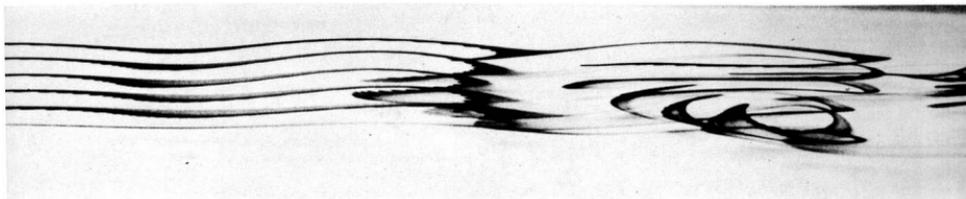
104. Неустойчивость пограничного слоя на пластинке. При рассчитанном по длине числе Рейнольдса $Re = 20\,000$ (верхний снимок) пограничный слой на пластинке, помещенной вдоль потока, ламинарен.

При $Re = 100\,000$ (нижний снимок) появляются двумерные волны Толлмина-Шлихтинга. Они становятся видимыми благодаря подкрашенной жидкости. Фото ONERA. [Werlé, 1980]



105. Естественный переход на слабонаклоненной пластинке. При том же числе Рейнольдса $100\,000$, но при угле атаки в 1° на пластинке происходит

переход к турбулентности. Фото ONERA. [Werlé, 1980]



106. Переход, возникающий вниз по потоку от волн Толмина-Шлихтинга. В левой части снимка волны двумерные; они становятся трехмерными, сворачиваясь в середине, и турбулентными – в правой части снимка. Линии меченых частиц на этом

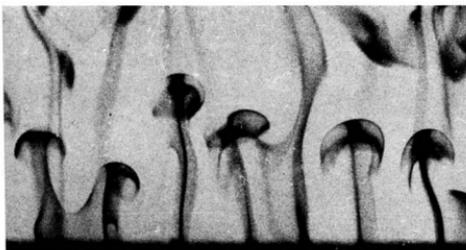
снимке, изображающем развитие процесса, были получены подкрашиванием воды. Число Рейнольдса, рассчитанное по длине, равно 400 000. [Wortmann, 1977]



107. Неустойчивость дымовой струйки от сигареты. На этих двух фотоснимках хорошо известного явления, сделанных при легком выдувании дыма, видно, как первоначально прямолинейный столб



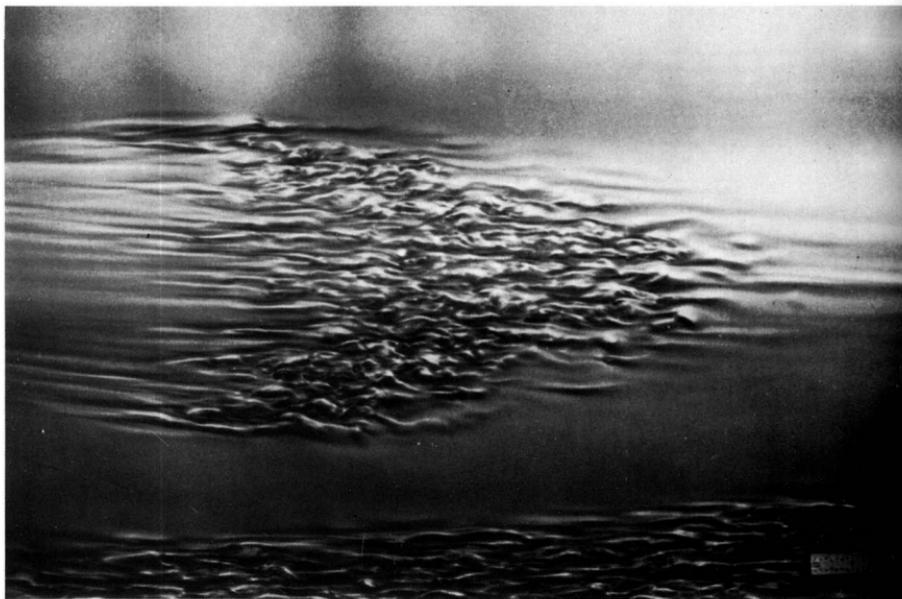
дыма становится неустойчивым и создает два концевых вихря, соединенных между собой сеткой вихревых петель, напоминающей лесенку. [Perry, Lim, 1978]



108. Термики, всплывающие от нагретой поверхности. Грибообразные столбики периодически поднимаются с нагретой медной пластинки. Визуализация осуществляется электрохимическим путем с



помощью подкраски тимолом-синим. На правом снимке скорость нагрева выше. [Sparrow, Husar, Goldstein, 1970]



109. Турбулентное пятно Эммонса. Процесс перехода ламинарного пограничного слоя в турбулентный на плоской пластинке происходит перемежающимся образом путем самопроизвольного случайного возникновения турбулентных пятен. Размер каждого пятна растет примерно пропорционально расстоянию при движении пятна вниз по потоку, которое идет со скоростью, составляющей некоторую долю скорости свободного пото-

ка. При этом пятно сохраняет характерную стреловидную форму, показанную на снимке при помощи суспензии алюминиевых хлопьев в воде. На снимке видна также распространяющаяся в поперечном направлении от дна канала область загрознания. В центре пятна число Рейнольдса, рассчитанное по расстоянию от передней кромки, равно 200 000. [Cantwell, Coles, Dimotakis, 1978]



110. Поперечное сечение турбулентного пятна. Турбулентное пятно на ранней стадии своего развития показано в поперечном сечении, нормальном к по-

току. С целью визуализации дым в аэродинамической трубе освещается лазерным световым ножом. [Perry, Lim, Teh, 1981]

Re = 100 000



Re = 200 000

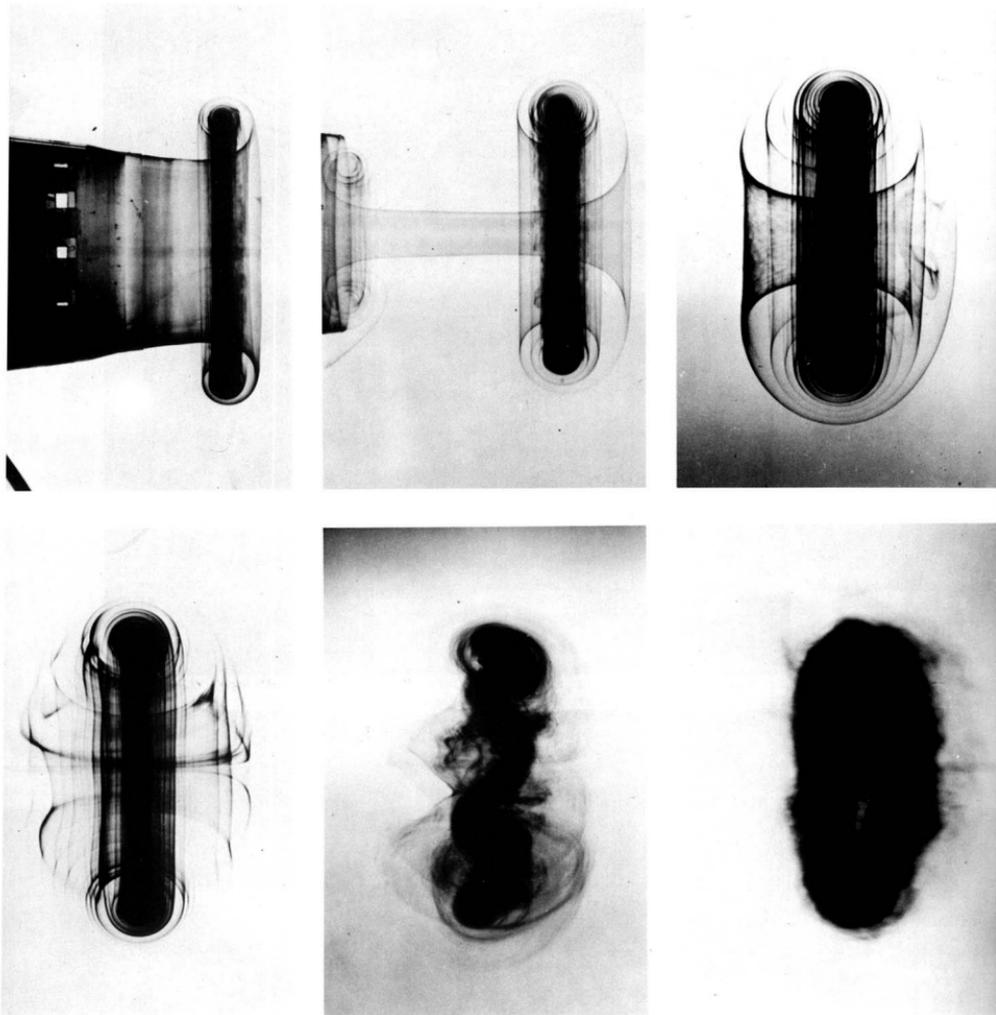


Re = 400 000



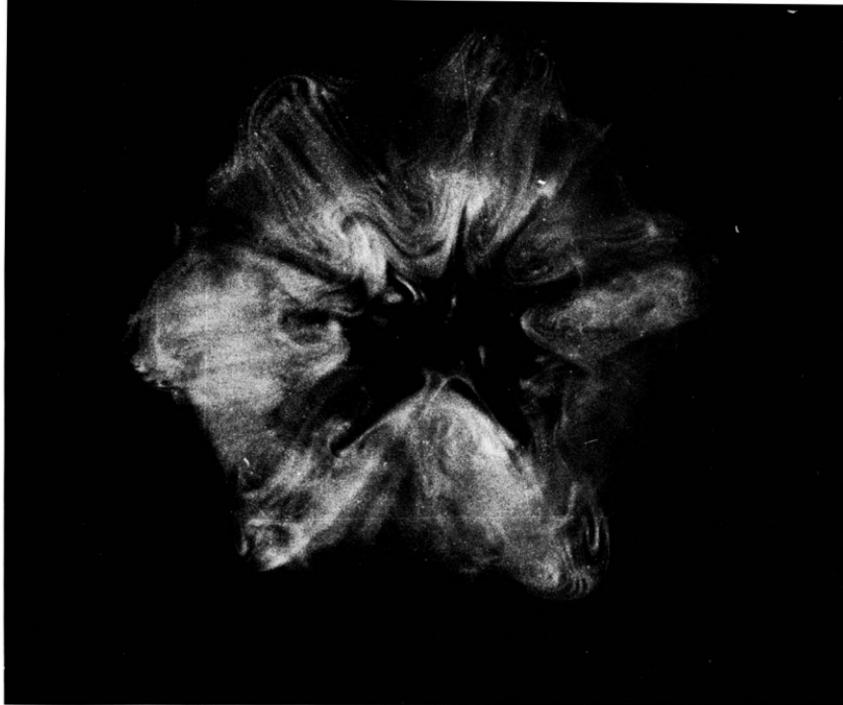
111. Турбулентное пятно при различных числах Рейнольдса. По мере возрастания числа Рейнольдса контур пятна становится более четким, а угол

его передней кромки заостряется. Визуализация осуществляется при помощи дыма в воздухе, освещаемого вспышкой. Фото R. E. Falco



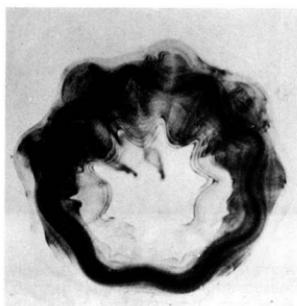
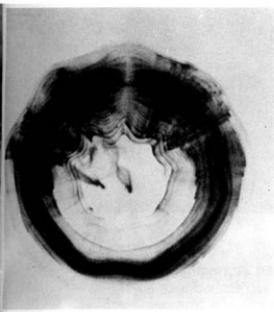
112. Неустойчивость ламинарного вихревого кольца. Верхний ряд снимков показывает истечение воды с введенной в нее краской через пятисантиметровое отверстие, в результате чего создается осесимметричное вихревое кольцо, подобное такому же кольцу в воздухе, показанному на фото 77. Число Рейнольдса этого кольца равно примерно 15000. Нижний ряд снимков показывает последо-

вательное разрушение кольца из-за неустойчивости. Развиваются синусоидальные возмущения с семью волнами на кольце. Внешние слои кольца в отличие от его ядра искривляются. Амплитуда волн возрастает до тех пор, пока кольцо внезапно не испытывает перехода к турбулентности при сохранении видимости его структуры. [Didden, 1977]



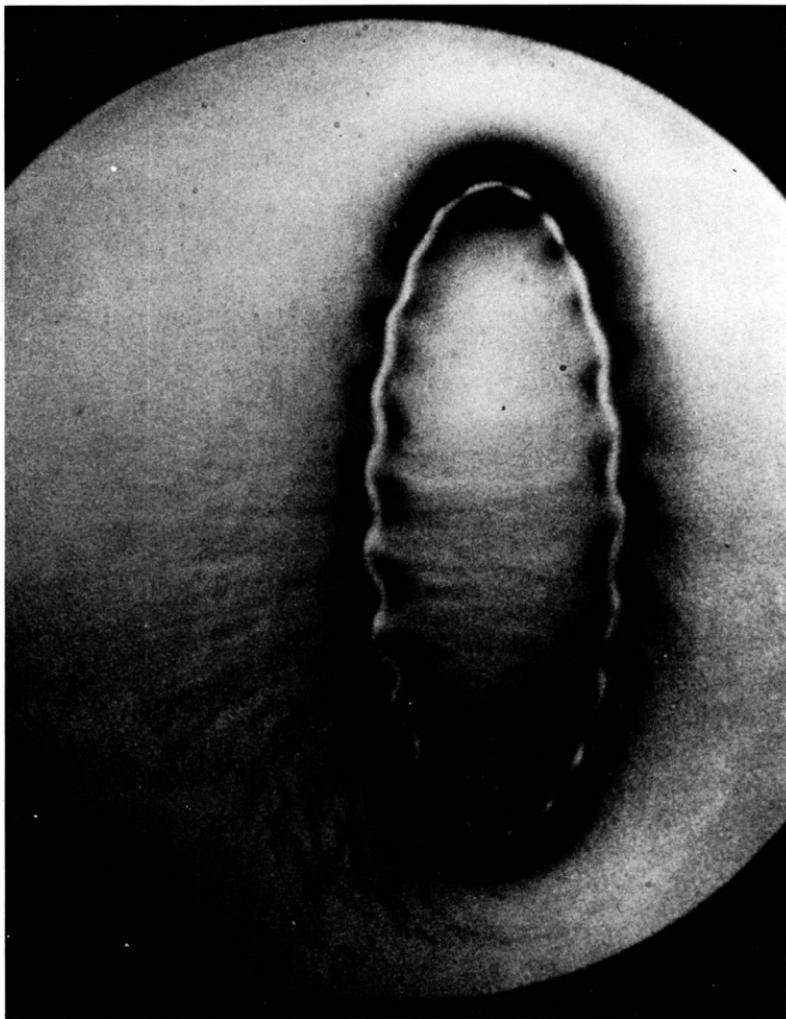
113. Гексагональное дымовое кольцо. Нарастание волн вокруг вихревого кольца часто называется неустойчивостью Уиднелла – по имени исследователя, впервые проанализировавшего это явление. К моменту, показанному на данном снимке, этот

процесс привел к замечательной симметричной структуре, созданной дымом в воздухе при числе Рейнольдса, примерно равном 1000. Фото G. J. Jameson, M. Urbicain



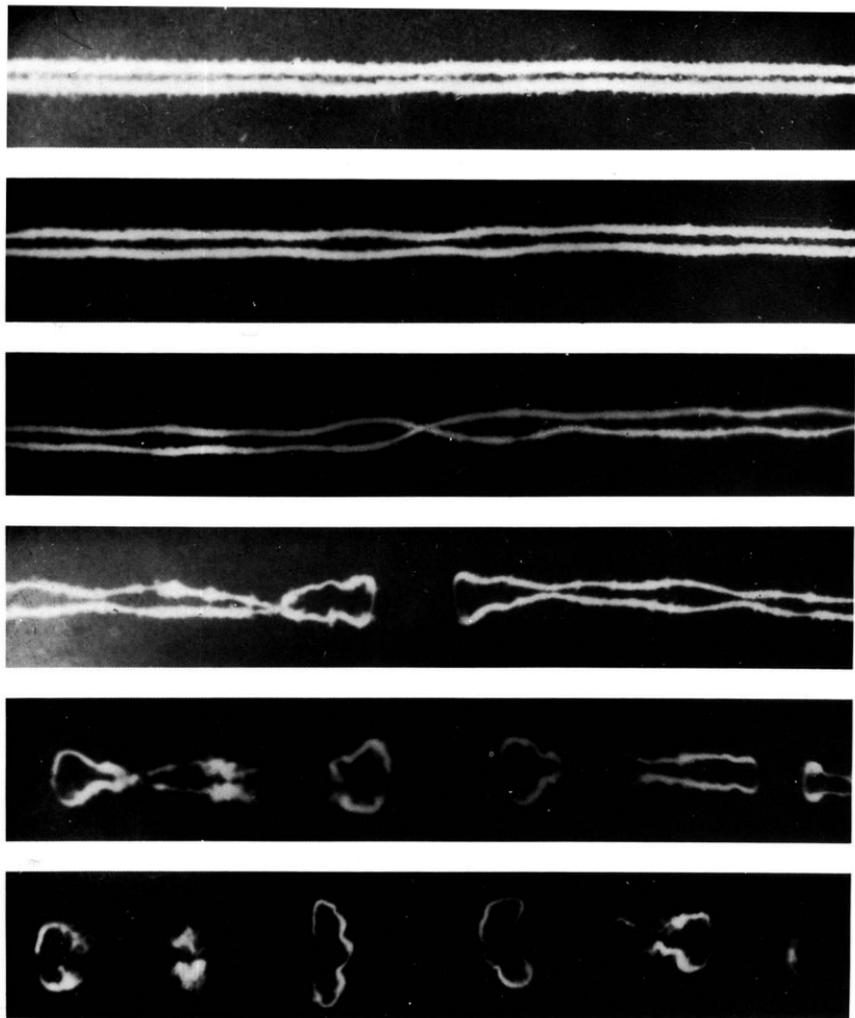
114. Рост волн на вихревом кольце. Эта последовательность снимков демонстрирует восемь волн, развивающихся вокруг ламинарного вихревого

кольца в воде, при несколько большем числе Рейнольдса, примерно равном 2000. [Didden, 1977]



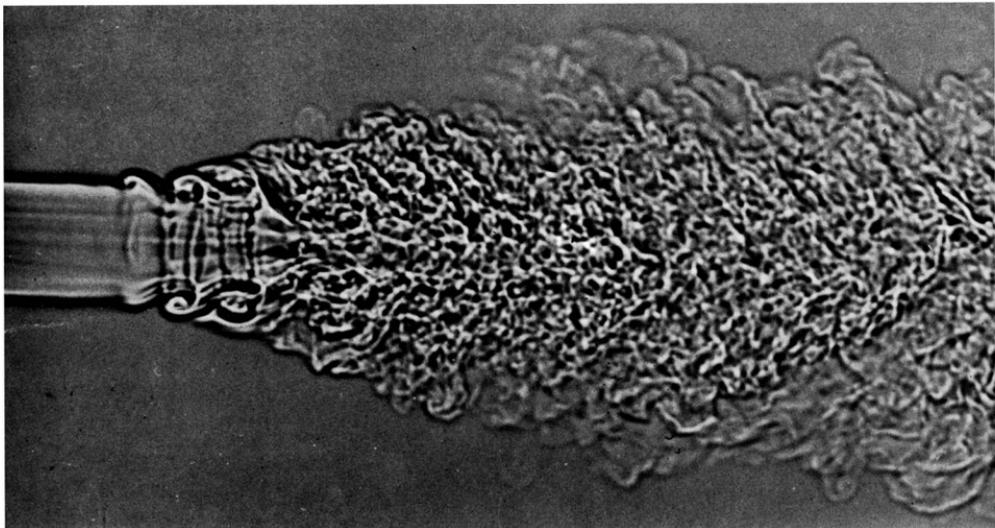
115. Неустойчивое вихревое кольцо при большом числе Рейнольдса. Число волн вокруг вихревого кольца с ростом числа Рейнольдса возрастает. Кольцо в воздухе, показанное на этом снимке и видимое в поле диаметром 15 см, визуализировано

при помощи фотографирования по шлирен-методу. Кольцо было создано в ударной трубе диаметром 8 см, находящейся на 50 см левее. Число Рейнольдса кольца равно примерно 40000. Фото Bradford Sturtevant



116. Неустойчивость пары концевых вихрей. Вихревой след за самолетом В-47 фотографировался непосредственно в небе с интервалами в 15 с после прохождения самолета. Вихревые ядра стали при этом видимыми благодаря конденсации влаги. Они медленно размываются и постепенно собираются в симметричную, почти синусоидальную

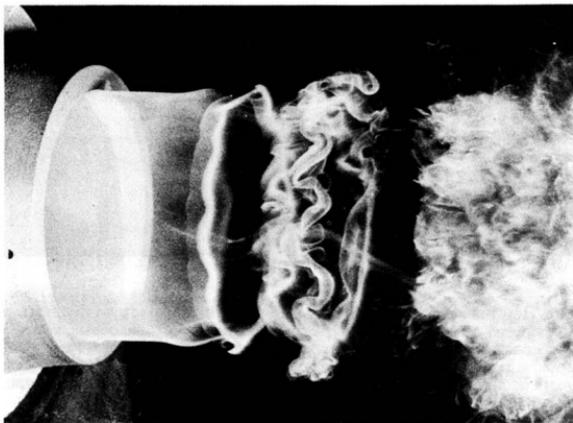
структуру, пока они не свяжутся и не образуют дуг вихревых колец. После этого след начинает быстро распадаться. Этот процесс называется обычно неустойчивостью Кроу – по имени исследователя, впервые давшего аналитическое описание его начальных стадий. [Crow, 1970], с любезного разрешения Meteorology Research Inc.



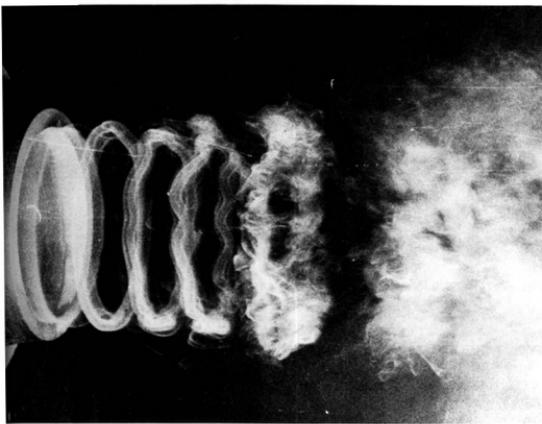
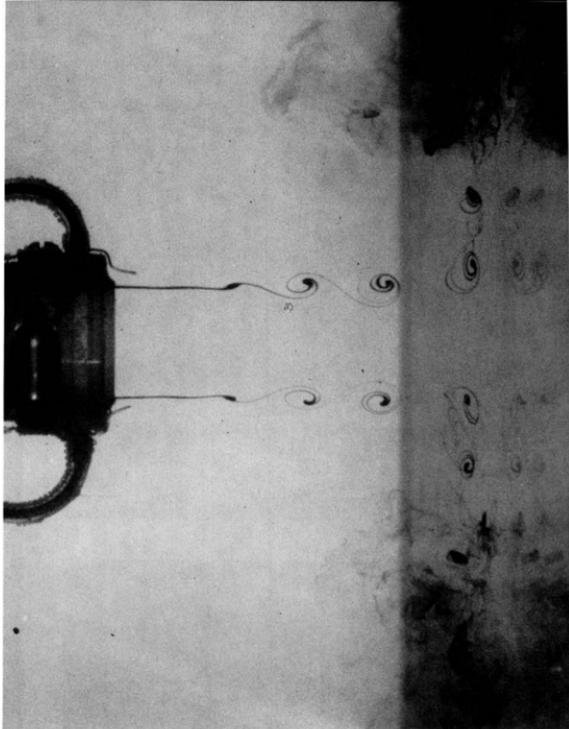
117. Неустойчивость круглой струи. Эта теневая фотография демонстрирует струю углекислого газа диаметром $1/4$ дюйма, вытекающую в воздух при скорости 127 фут/с. Когда струя вытекает из сопла при числе Рейнольдса, равном примерно

30 000, она ламинарна. На расстоянии одного диаметра вниз по потоку струя обнаруживает неустойчивость, после чего происходит образование вихревых колец и переход к турбулентности. Фото Fred Landis, Ascher H. Shapiro

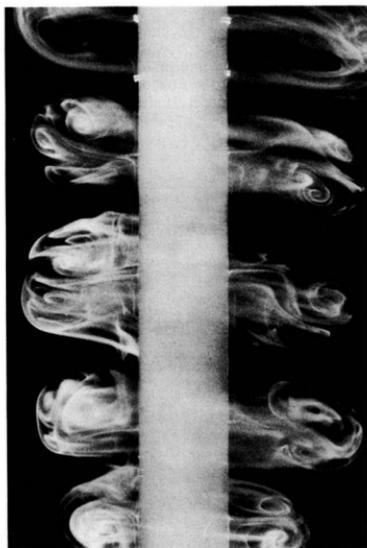
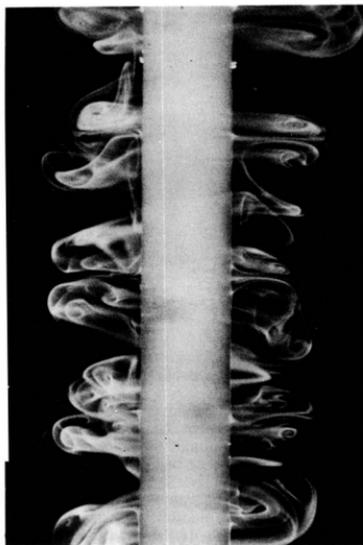
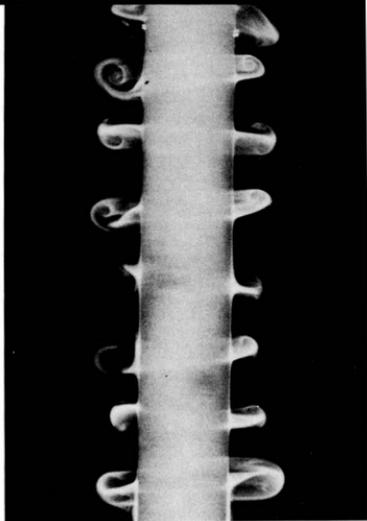
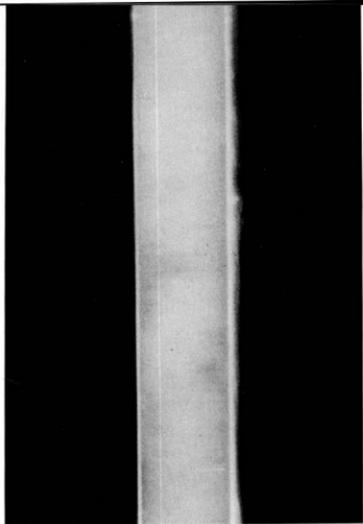
118. Неустойчивость круглой струи. Дым дает несколько иную картину того же течения, что и на предыдущем снимке, при числе Рейнольдса, равном примерно 13 000. Волновая неустойчивость вихревых колец и их последующее разрушение аналогичны показанному на фото 114. Фото R. Wille, A. Michalke, любезно предоставлено H. Fiedler



119. Неустойчивая ламинарная струя, ударяющая в пластинку. Визуализация сдвигового слоя струи осуществляется с помощью краски в воде при числе Рейнольдса, рассчитанном по диаметру и скорости на выходе, равном 4000. Плоская пластинка располагается на расстоянии трех диаметров от сопла. Развитие струи модулируется обратным воздействием вихрей, ударяющихся о пластинку. Фото Ho Chih-Ming

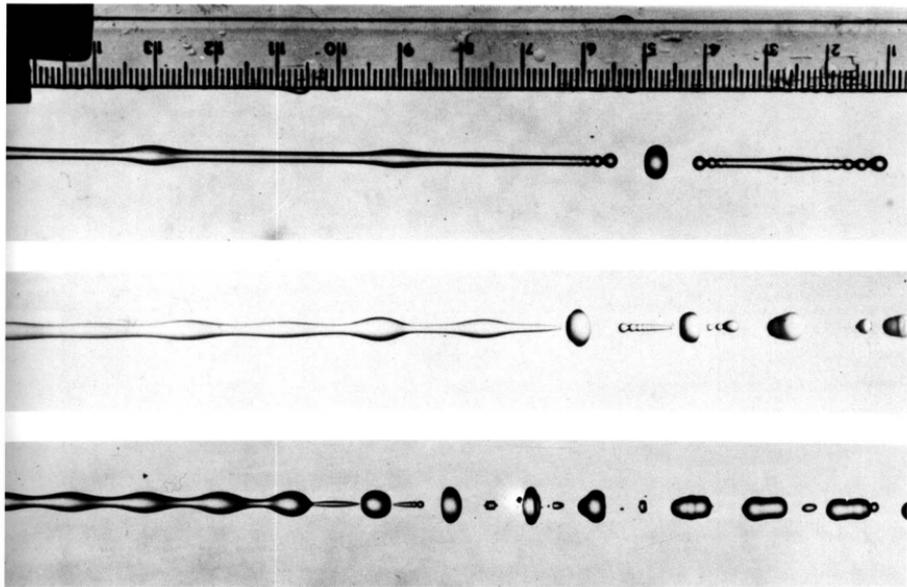


120. Вынужденная неустойчивость круглой струи. Здесь слабые периодические звуковые волны создают громкоговорителем, расположенным вблизи струи и работающим на ее собственной частоте. В результате длина ламинарного пограничного слоя на периферии струи уменьшается и начинается образование вихревых колец, более регулярное, чем при невынужденном возникновении неустойчивостей, как на фото 117 и 118. Фото R. Wille, A. Michalke, любезно предоставлено H. Fiedler



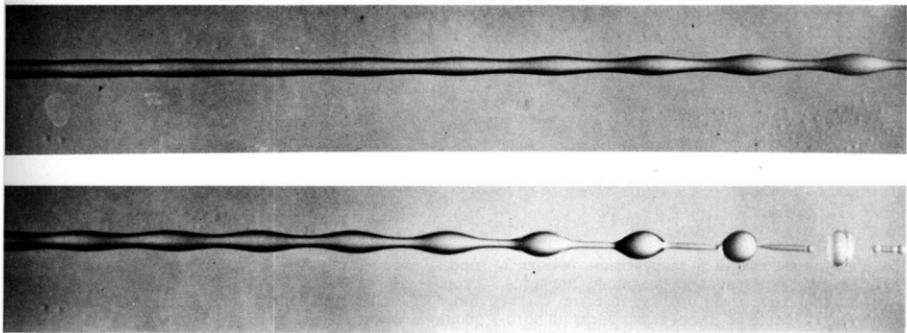
121. Рост пограничного слоя на цилиндре, импульсивно приведенном во вращение. Стержень диаметром 1 см начинает вращаться в неподвижной воде. Число Рейнольдса, рассчитанное по скорости поверхности стержня, равно 109. Визуализация электролитическим методом показывает одно-

родный пограничный слой через 0,6 с после начала движения. Через 4,7 с образуются кольцеобразные вихри, и, как видно на двух нижних снимках, сделанных через 8,7 и 12,3 с, они растут и сливаются. [Taneda, 1977]



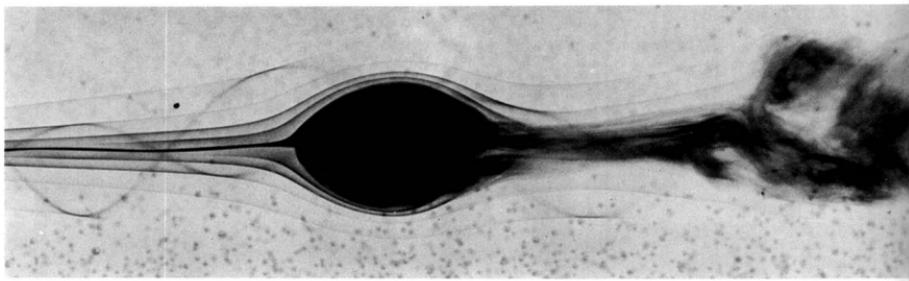
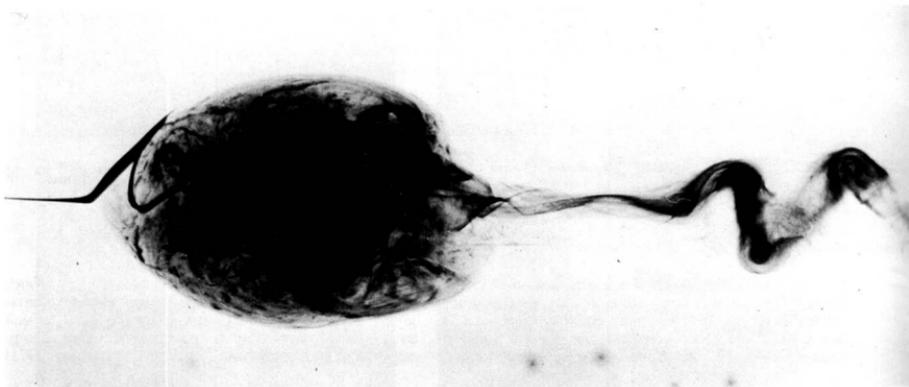
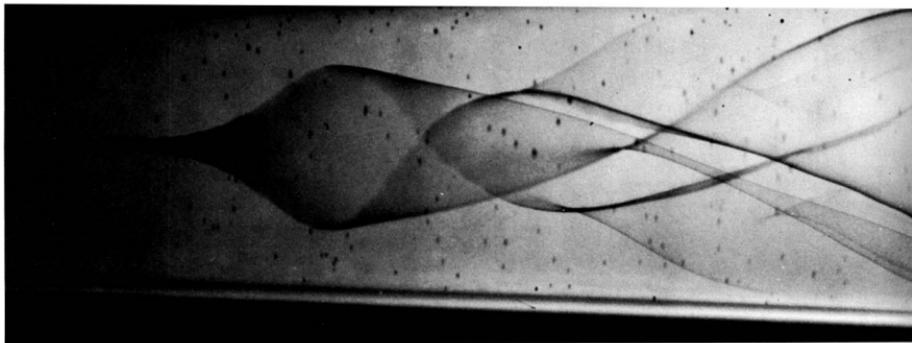
122. Капиллярная неустойчивость жидкой струи. Вода, вытекающая под давлением из четырехмиллиметровой трубы, получает возмущения различной частоты от громкоговорителя. Длины волн составляют 42; 12,5 и 4,6 диаметра, причем послед-

нее значение близко к рэлеевскому значению, отвечающему максимальной скорости роста возмущений. На двух верхних фотографиях видны вторичные выпуклости, расположенные между первичными гребнями. [Rutland, Jameson, 1971]



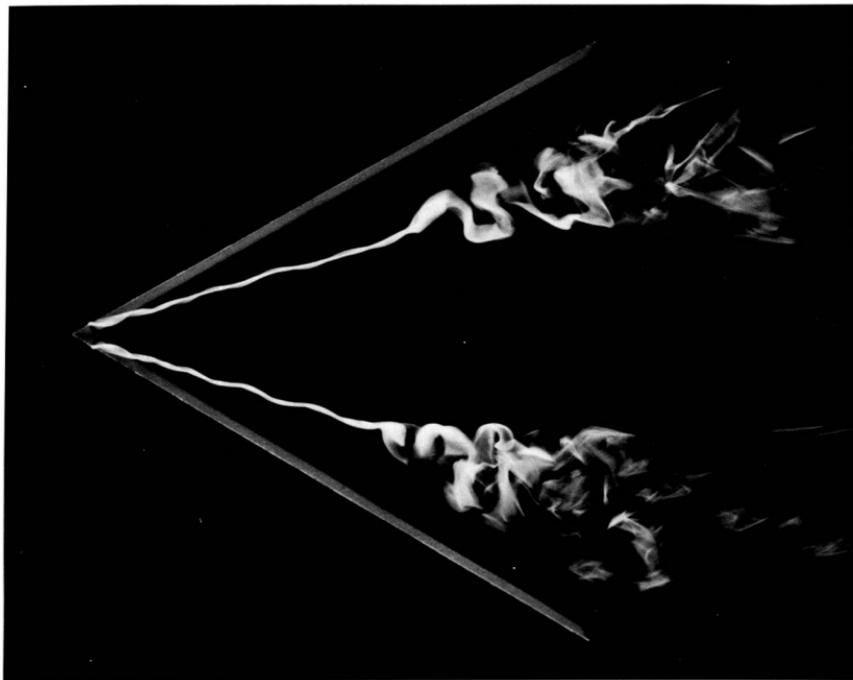
123. Влияние вращения на капиллярную неустойчивость. Неустойчивость водяной струи с возбуждением на длине волны в 4,8 диаметра, показанная

на верхнем снимке, увеличивается (нижний снимок) за счет вращения со скоростью 435 об/мин. [Rutland, Jameson, 1970]

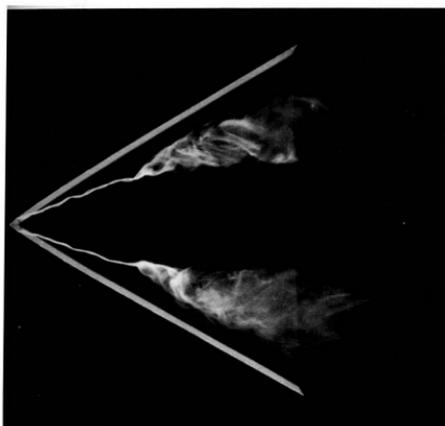


124. Разрушение вихрей в закрученном течении в трубе. Вода, закрученная с помощью лопастей, расположенных вверх по потоку, течет по слегка расширяющейся трубе. Затем также вверх по потоку от зоны наблюдения в воду вводится краска. При этом наблюдаются три основных типа разрушения вихрей. Двойная спиральная структура (верхний снимок) образуется при числах Re , не

превышающих примерно 2000. При более высоких скоростях (средний снимок) вихревое ядро проходит спирально внутри стоячего «пузыря» рециркуляционной области в жидкости. При еще более сильной закрутке (нижний снимок) образуется гладкое, почти осесимметричное жидкое тело. [Сагкая, 1971]

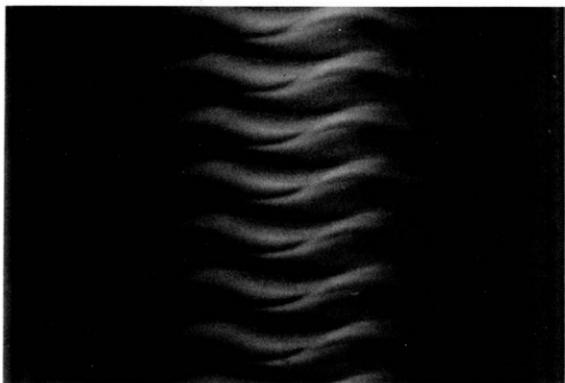
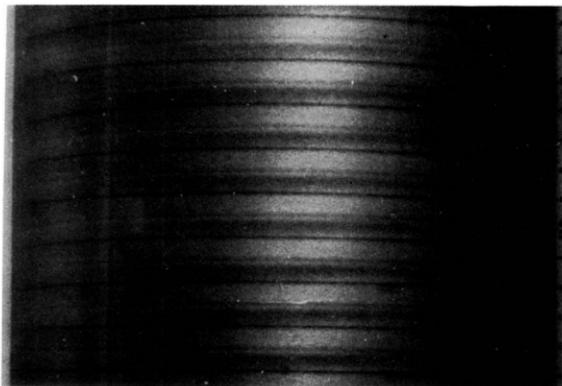


125. Разрушение вихрей над треугольным крылом. Тонкое крыло, имеющее в плане форму равностороннего треугольника, под углом атаки 20° наблюдается сверху в гидродинамической трубе. Число Рейнольдса, рассчитанное по хорде длиной 10 см, равно 5000. Струйки подкрашенной жидкости показывают, что пара ламинарных вихрей, сворачивающихся от места отрыва на передних кромках, внезапно взрывным образом превращается в карманы турбулентной жидкости. Фото ONERA. [Werlé, 1960a]

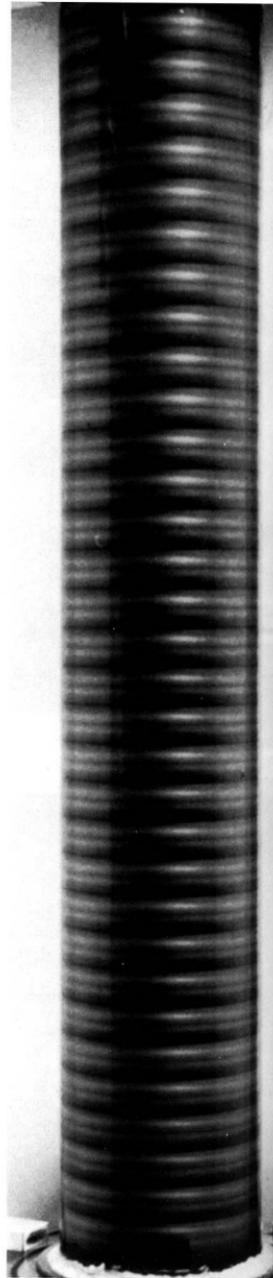


126. Влияние числа Рейнольдса на разрушение вихрей. Когда число Рейнольдса увеличивается от 5000 на предыдущем снимке до 10 000 на этом, место разрушения вихрей сдвигается вверх по потоку. Здесь показано почти предельное его положение, не изменяющееся при дальнейшем увеличении скорости вплоть до $Re = 20\,000$. Фото ONERA. [Werlé, 1960a]

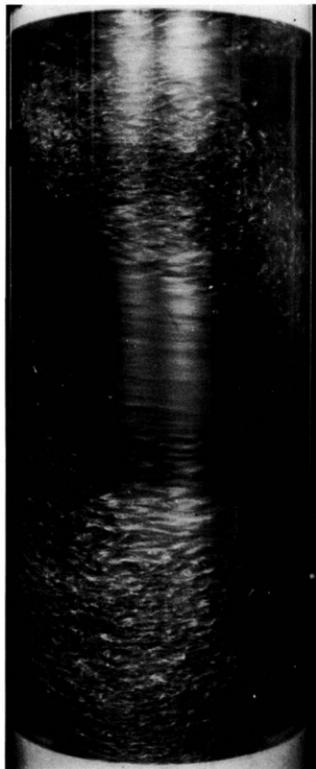
127. Осесимметричные ламинарные вихри Тейлора. Машинное масло, содержащее алюминиевый порошок, заполняет зазор между неподвижным внешним стеклянным цилиндром и вращающимся внутренним металлическим цилиндром с относительным радиусом $0,727$. Торцовые пластинки сверху и снизу неподвижны. Скорость вращения в $9,1$ раза больше той, для которой Тейлор предсказывает возникновение регулярно расположенных тороидальных вихрей, видимых на снимке. Радиальная компонента скорости течения направлена внутрь на более широких темных горизонтальных кольцах и наружу – на более узких. Движение началось внезапно, при этом создаются вихри более узкие, чем те, которые получаются при плавном начале движения. [Burkhalter, Koschmieder, 1974]



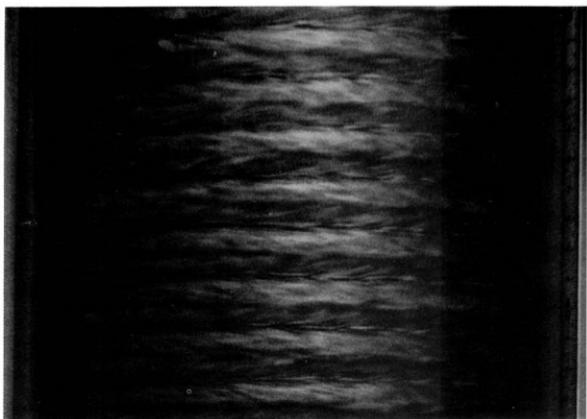
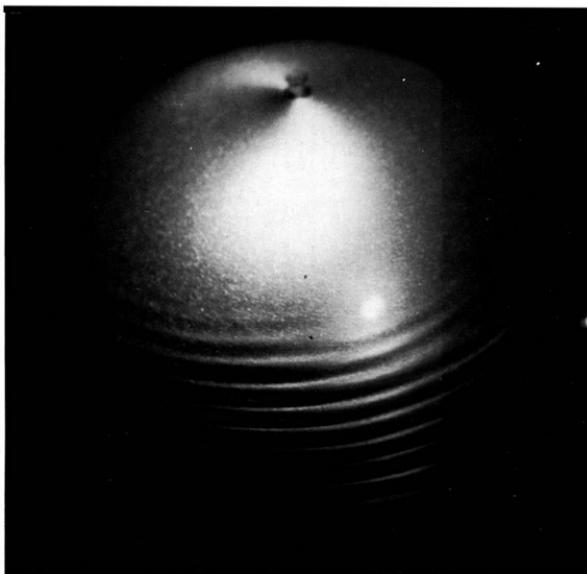
128. Ламинарные вихри Тейлора в узком зазоре. Внутренний цилиндр большего радиуса в той же установке соответствует относительному радиусу, равному $0,896$. Как и прежде, вращается только внутренний цилиндр. На верхнем снимке показана центральная область осесимметричных вихрей при скорости вращения, в $1,16$ раза превышающей критическую. На нижнем снимке при скорости вращения, в $8,5$ раза большей критической, течение оказывается двоякопериодическим с шестью волнами по окружности вихрей, дрейфующими при вращении. [Koschmieder, 1979]



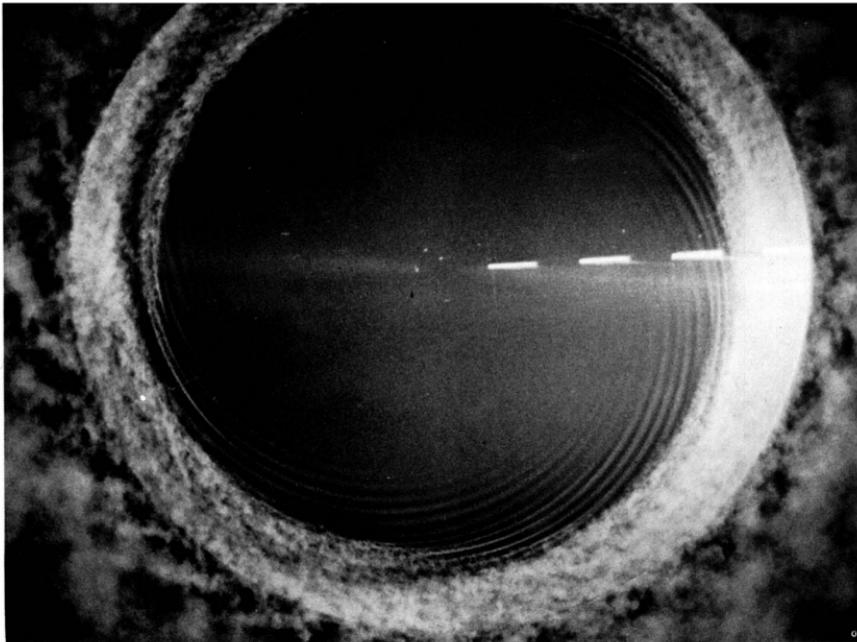
129. Вихри Тейлора между сферами. При отношении радиусов сфер 0,95, когда внешняя сфера неподвижна, а внутренняя вращается с числом $Re = 7600$, алюминиевые частицы в силиконовом масле позволяют видеть ламинарные вихри вблизи экватора. [Sawatzki, Zieper, 1970]



130. Спиралевидная турбулентность между цилиндрами, вращающимися в противоположные стороны. Показанная здесь структура из чередующихся ламинарных и турбулентных спиралей, напоминающая «знак парикмахерской» и впервые обнаруженная Коулзом, была образована путем первоначального придания вращения внешнему цилиндру от состояния покоя до $Re = 10\,000$ (рассчитано по внешнему радиусу), а затем медленного ускорения внутреннего цилиндра вплоть до $Re = 4200$ (рассчитано по внутреннему радиусу). Фото М. Gorman, Н. L. Swinney



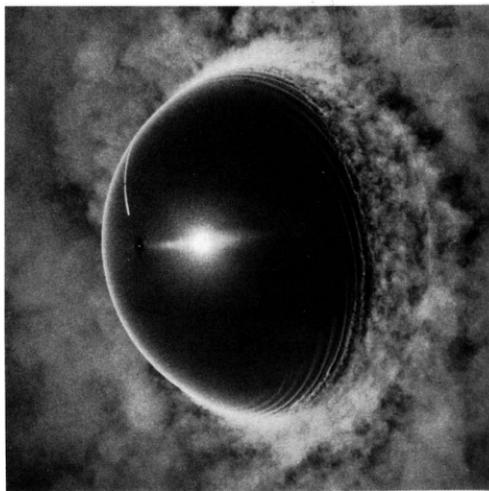
131. Осесимметричные турбулентные вихри Тейлора. Условия совпадают с теми, которые соответствуют фото 127 и 128, однако скорость вращения в 1625 раз больше критической. Внезапное начало вращения создает первоначально хаотическое движение, однако в течение минуты возникает видная на снимке регулярная стационарная турбулентная структура. [Koschmieder, 1979]

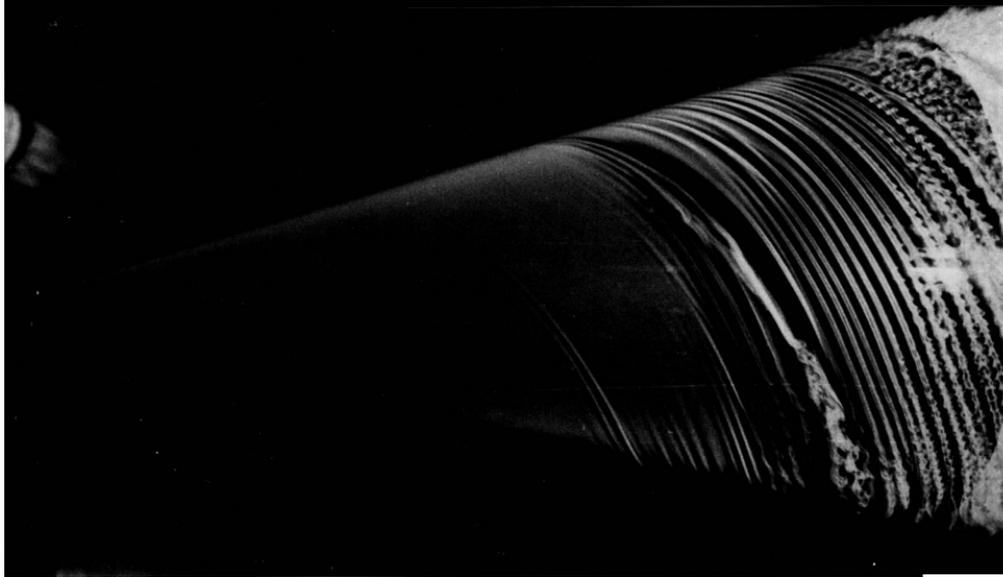


132. Спиральные вихри на вращающемся диске. Диск диаметром 40 см вращается против часовой стрелки в воздухе со скоростью 1800 об/мин. Газ, выделяющийся из четыреххлористого титана, нанесенного на окрашенную в черный цвет поверх-

ность, наблюдается с помощью стробоскопического устройства. Пограничный слой, ламинарный вблизи центра диска, претерпевает переход, осуществляющийся ориентировочно через 32 вихря. [Kobayashi, Kohama, Takamodate, 1980]

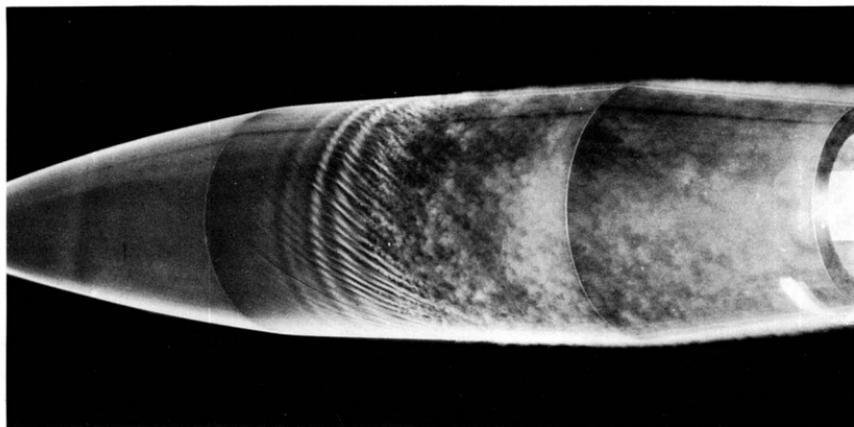
133. Спиральные вихри на вращающейся сфере. Сфера диаметром 25 см вращается в воздухе со скоростью 1500 об/мин с вектором угловой скорости, направленным влево. Стробоскопическое наблюдение газообразного четыреххлористого титана показывает, что, как и на предыдущем снимке для диска, в области перехода пограничного слоя на сфере появляются спиральные вихри. Белая радиальная линия используется для синхронизации стробоскопа. Фото Y. Kohama, R. Kobayashi





134. Спиральные вихри на конусе, вращающемся в потоке. Конус с полууглом раствора 15° и диаметром основания 20 см вращается со скоростью 700 об/мин в осевом воздушном потоке, имеющем

скорость 2,9 м/с. Видно, что по мере развития спиральных вихрей они приобретают кружевную структуру. Фото Р. Kobayashi, Y. Kohama, M. Kurosawa



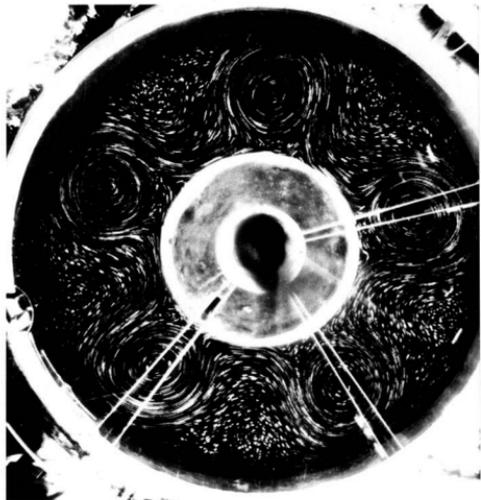
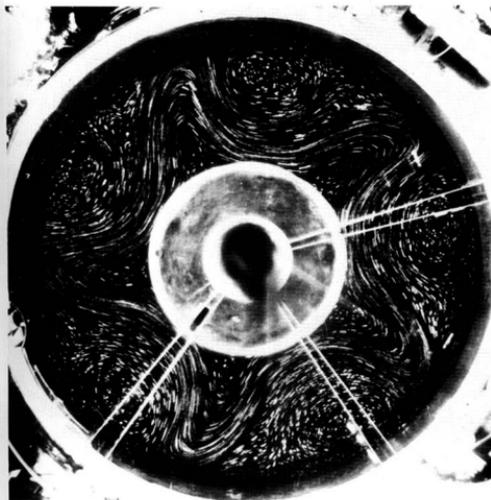
135. Одновременно проявляющиеся волны Толлмина – Шлихтинга и спиральные вихри. На экспериментах с вращающимся телом в дымовой аэродинамической трубе видно, что здесь налагаются две моды неустойчивости. Число Рейнольдса, рас-

считанное по длине, примерно равно 1 млн, а окружная скорость на поверхности цилиндрической части составляет 0,61 от скорости свободного потока. [Mueller, Nelson, Kegelman, Morkovin, 1981]



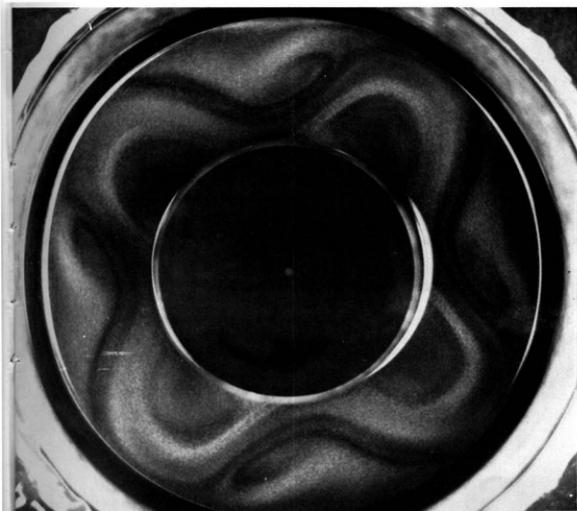
136. Конвекция во вращающемся цилиндре. Структура течения во вращающейся «сковороде-кастрюле», нагретой по внешней границе и охлажденной в центре, удивительно похожа в своих основных чертах на структуру земной атмосферы в средних широтах. Здесь слой воды глубиной 4 см в цилиндре диаметром 19,5 см вращается против часовой стрелки, совершая 30 об/с, и нагревается при но-

минальной мощности 150 Вт на внешней границе. Фото отрезков траекторий алюминиевых частиц на свободной поверхности демонстрирует узкие струйки, а также широкий спектр нерегулярных вихрей. Общая структура течения напоминает карту погоды полушария для верхней тропосферы. [Fultz et al., 1959]

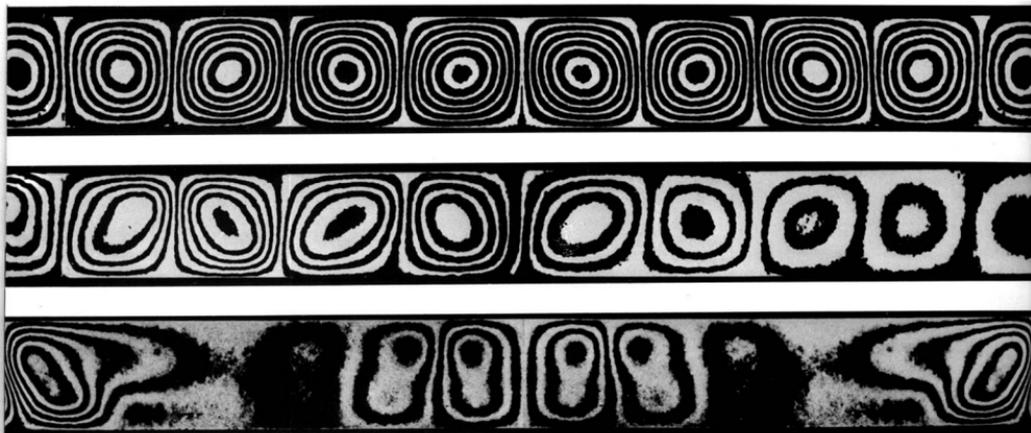


137. Конвекция во вращающейся кольцевой области. Волновые и струйные движения, показанные на предыдущем снимке, становятся значительно более регулярными и периодическими, когда вращающаяся жидкость сосредоточена в кольцевой области, ограниченной центральным ядром. За пределами границы устойчивости наблюдаются симметричные движения, а большую часть внутренней области занимают стационарные или периодически флуктуирующие волны. При усилении вращения волновые числа волн во внутренней области становятся последовательно все больше-

ми. Приведенные здесь фотографии демонстрируют две фазы самопроизвольной периодической флуктуации (период соответствует 16 оборотам), происходящей в пятиволновой системе в слое воды глубиной 7 см между цилиндрами с радиусами 19,5 и 7,8 см при угловой скорости вращения $0,50 \text{ с}^{-1}$. Номинальная мощность нагрева составляет 80 Вт на внешней границе и 15 Вт на внутреннем ядре. Волны медленно распространяются в направлении против часовой стрелки по отношению к сосуду. [Fultz, Spence, 1967]

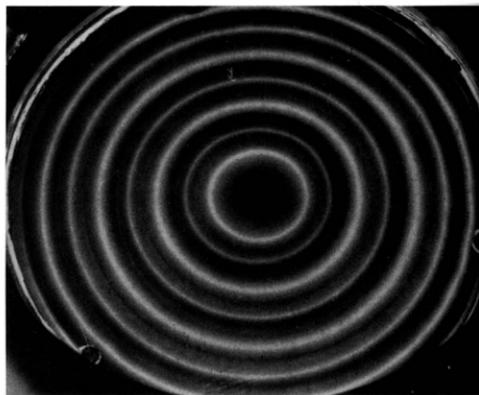
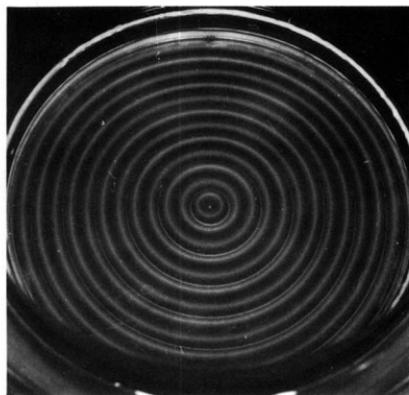


138. Конвекция во вращающейся кольцевой области при отрицательном градиенте температуры в радиальном направлении. Здесь ядро на 15° теплее, чем внешняя граница. Бароклиническая неустойчивость приводит к образованию четырех волн, визуализированных с помощью алюминиевого порошка, плавающего в воде. Вращение происходит в направлении против часовой стрелки. Диаметры кольца равны 5 и 10 см, а глубина слоя воды равна 10 см. Угловая скорость составляет $2,5 \text{ рад/с}$. [Koschmieder, 1972]



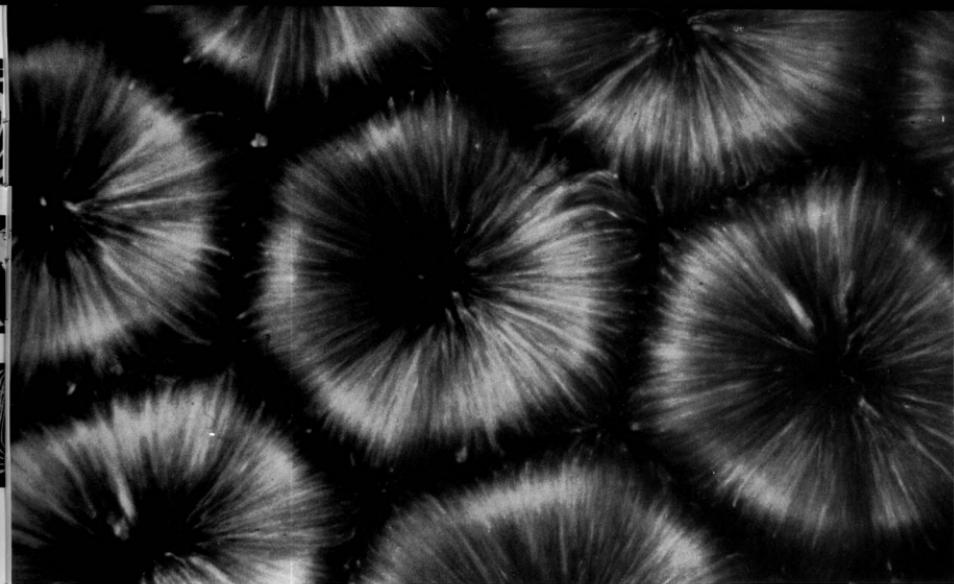
139. Конвективные валики, движимые плавучестью. Дифференциальные интерферограммы демонстрируют сбоку картины конвективной неустойчивости силиконового масла в прямоугольном ящике с относительными размерами сторон 10 : 4 : 1, подогреваемом снизу. На верхнем снимке видна классическая ситуация Рэлея – Бенара: рав-

номерный нагрев создает валики, параллельные более короткой стороне. На средней фотографии разность температур, а следовательно, и амплитуда движения возрастают в направлении справа налево. На нижней фотографии ящик вращается относительно вертикальной оси. [Oertel, Kirchartz, 1979; Oertel, 1982a]



140. Круговые конвективные ячейки, движимые плавучестью. Силиконовое масло, содержащее алюминиевый порошок, покрыто равномерно охлаждаемой стеклянной пластинкой, исключаяющей влияние поверхностного натяжения. Круговая граница создает круговые валики. На левом снимке медное дно равномерно подогревается при условиях, соответствующих числу Рэлея, в 2,9 раза пре-

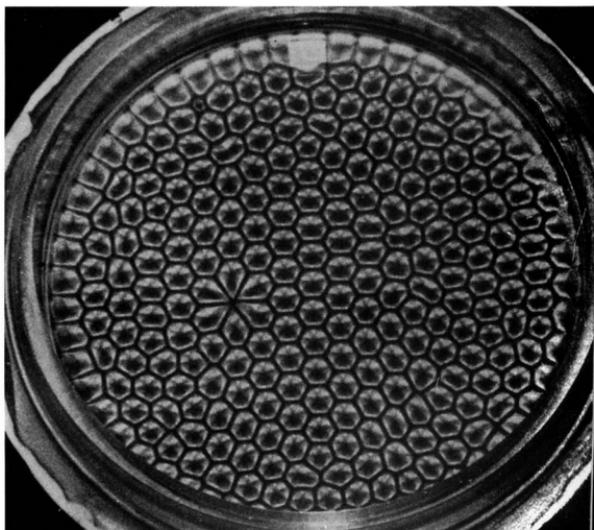
вышающему критическое, что приводит к образованию регулярных валиков. На правом снимке дно около внешней границы горячее, чем в центре. Тем самым создается глобальная циркуляция, которая, будучи наложена на регулярные круговые валики, порождает попеременно более крупные или более мелкие валики. [Koschmieder, 1974, 1966]

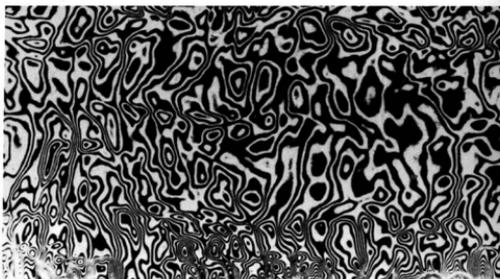
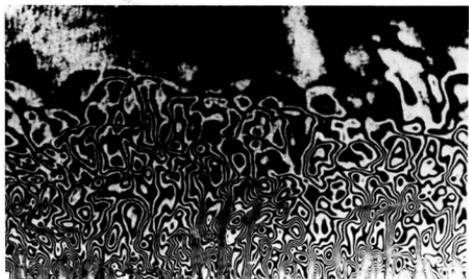


141. Конвекция, создаваемая поверхностным натяжением (конвекция Бенара). Приводимый снимок, увеличенный примерно в 25 раз, демонстрирует гексагональную конвективную структуру в слое силиконового масла глубиной 1 мм при равномерном нагреве снизу и воздействии окружающего воздуха сверху. Если верхняя поверхность свободна, то течение создается главным образом неоднородностями

поверхностного натяжения, а не плавучестью, как на фото 139 и 140. Свет, отраженный от алюминиевых хлопьев, демонстрирует подъем жидкости в центре каждой ячейки и ее опускание на краях. Время экспозиции составляет 10 с, тогда как время движения жидкости поперек ячейки от центра к краю равно 2 с. Фото М. G. Velarde, M. Yuste, J. Salan

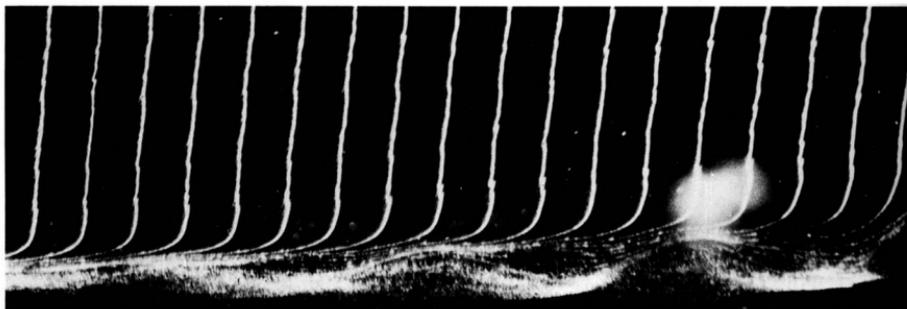
142. Нерегулярности гексагональной структуры конвективной картины Бенара. Как видно на снимке, гексагональная структура ячеек, характерная для конвективной неустойчивости, вызванной главным образом поверхностным натяжением, приспосабливается к круговой границе. Алюминиевый порошок демонстрирует течение в тонком слое силиконового масла с кинематической вязкостью $0,5 \text{ см}^2/\text{с}$ на равномерно нагретой медной пластинке. Маленькая выемка на пластинке приводит к возникновению нерегулярности ячеек в области слева, где образуются ячейки в форме огранки бриллианта. Это показывает, насколько картина чувствительна к малейшим нарушениям регулярности. [Koschmieder, 1974]





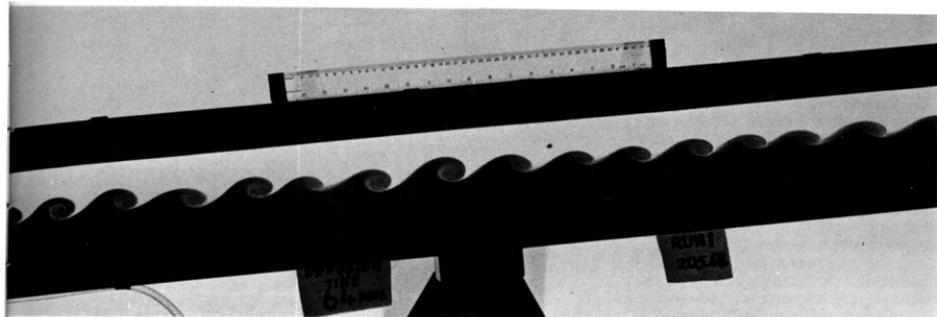
143. Формы неустойчивости в нагретом слое. Фреон, заполняющий пространство между горизонтальными пластинками, мгновенно нагревается снизу. Серия последовательно снятых дифференциальных интерферограмм демонстрирует

формы неустойчивости в возникающем конвективном факеле и тепловом пограничном слое на нижней пластинке, переход к турбулентности и турбулентные структуры в верхнем и нижнем пограничных слоях. [Oertel, 1982b]



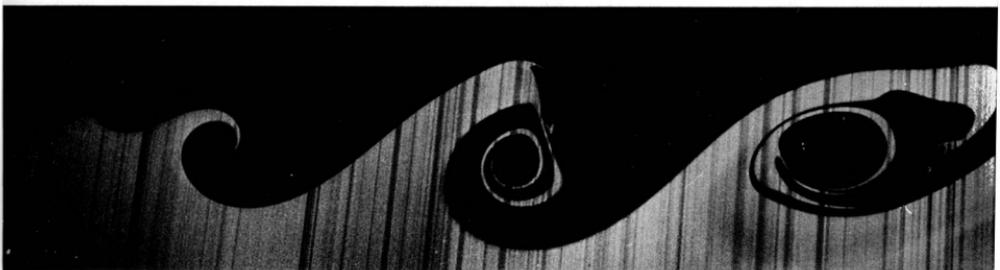
144. Вторичная неустойчивость на вогнутой стенке. Трехмерная неустойчивость типа Голлмина-Шликтинга наблюдается в зонах неустойчивого пограничного слоя на вогнутой стенке, простирающихся в продольном направлении между вих-

рями Тейлора-Гёртлера. Поток течет слева направо и виден здесь в направлении вдоль размаха. Линии пузырьков начинаются от катодной проволочки, установленной перпендикулярно стенке для визуализации профилей скорости. [Vippes, 1972]



145. Неустойчивость Кельвина–Гельмгольца в стратифицированном сдвиговом течении. Длинная труба прямоугольного сечения, первоначально горизонтальная, заполнена водой поверх окрашенного соляного раствора. Примерно в течение часа происходит свободная диффузия жидкостей, а затем труба внезапно наклоняется на угол 6° , приводя в движение обе жидкости. Соляной раствор

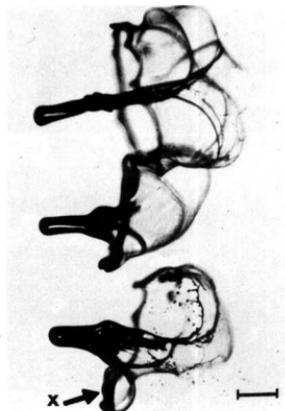
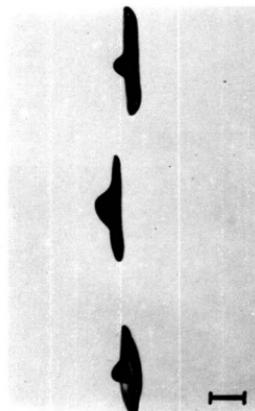
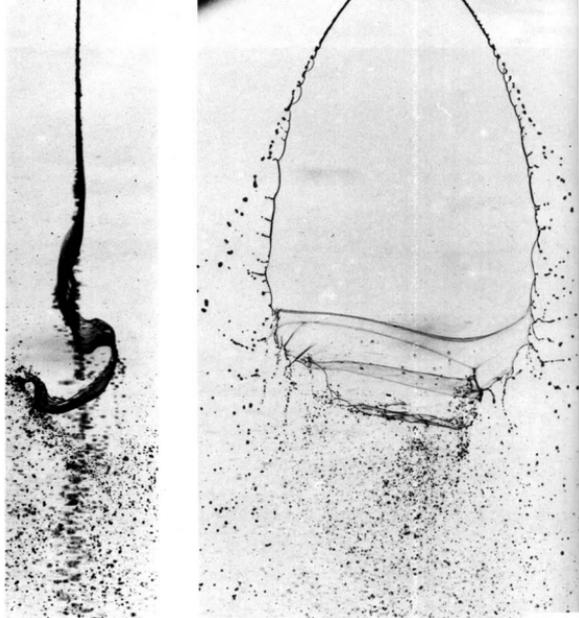
приобретает постоянное ускорение в направлении вниз под уклон, тогда как находящаяся сверху вода аналогично ускоряется вверх. Через несколько секунд на поверхности раздела возникает синусоидальная неустойчивость, которая в момент, запечатленный на снимке, уже нелинейным образом разрослась в регулярные спиральные валики. [Thorpe, 1971]



146. Неустойчивость Кельвина–Гельмгольца наложенных потоков. Нижний поток воды движется влево быстрее, чем верхний. Вода содержит краску, которая флуоресцирует при освещении вертикальным лазерным световым ножом. Более быстрый поток получает синусоидальные возмуще-

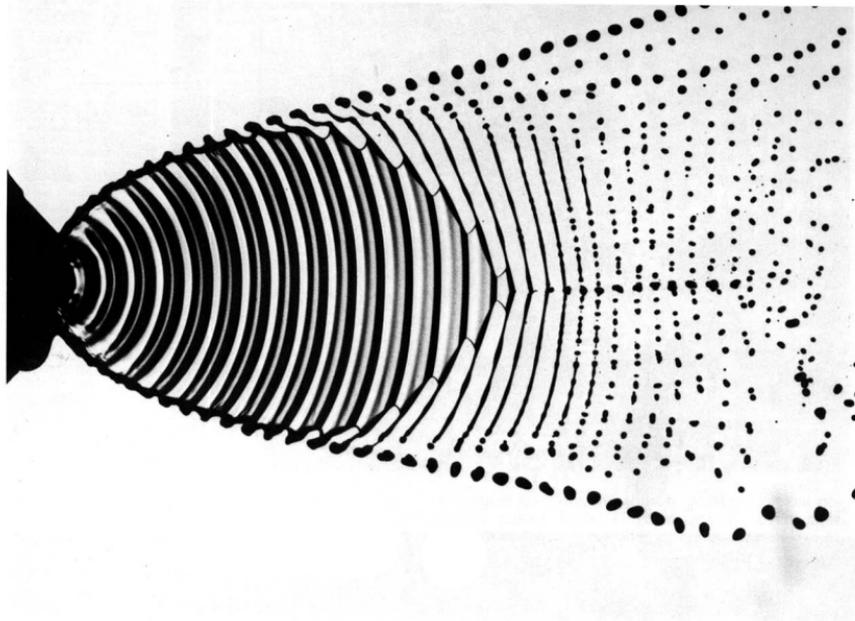
ния с наиболее неустойчивой частотой (верхний снимок) или с вдвое меньшей частотой (нижний снимок), так что движение выходит на субгармонику. Фото F. A. Roberts, P. E. Dimotakis, A. Roshko

147. Волны Кельвина–Гельмгольца на поверхности тонкой жидкой пелены. Вода выпускается сверху вниз в форме утончающейся плоской пелены из сопла с веерообразным распылением. Сопло синусоидально колеблется перпендикулярно плоскости пелены с частотой, создающей волновую неустойчивость. Вид сбоку показывает начальный экспоненциальный рост возмущений, предсказываемый двумерной теорией, а также развитие сложной волновой формы при возрастании амплитуды. Поток капель в осевом направлении в нижней части снимков получается в результате коллапса краев пелены, как видно на снимке течения в плане. [Crapper, Dombrowski, Jepson, Pyott, 1973]



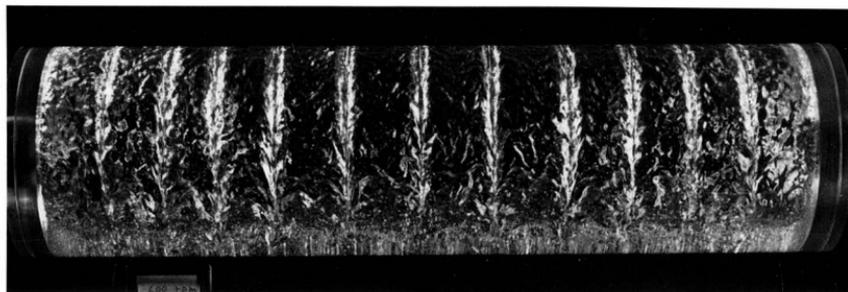
148. Разрушение капель в воздушном потоке. Капли воды в потоке воздуха, дующем слева направо, показаны здесь соответственно через 969, 1528 и 1622 мкс после их впрыскивания в поток. Характерная зонтообразная неустойчивость возникает здесь при числе Вебера, равном 32,5. При числах Вебера, чуть меньших этого значения, зонтообраз-

ная неустойчивость заменяется корзинообразной, возникновение которой указывается символом X на третьем снимке. [Simpkins, 1971], перепечатано с разрешения из журнала: Nature: Physical Science, 233, No. 37, p. 31–33. Copyright © 1971 Macmillan Journals Limited



149. Распад жидкой пленки. Изучение образования каплей в пленках показывает, что промежуточную стадию этого процесса обычно составляет образование нитей. Поэтому управление образованием нитей может стать средством регулирования размера каплей. Один из подходов к этому состоит в

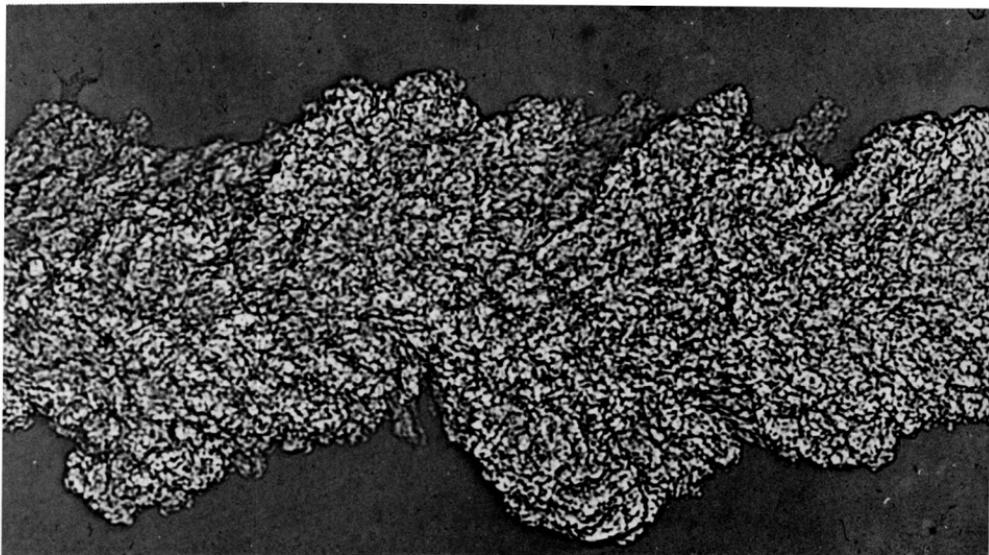
создании вынужденных колебаний сопла. Данный снимок показывает плоскую ламинарную пленку воды, выпускаемую из сопла с верным распылением, колеблющегося в осевом направлении с резонансной частотой. Фото N. Dombrowski



150. Ячеистые структуры во вращающемся горизонтальном цилиндре. Пустой цилиндр из плексигласа, частично заполненный жидкостью, вращается относительно горизонтальной оси так, что нижняя часть движется по направлению к наблю-

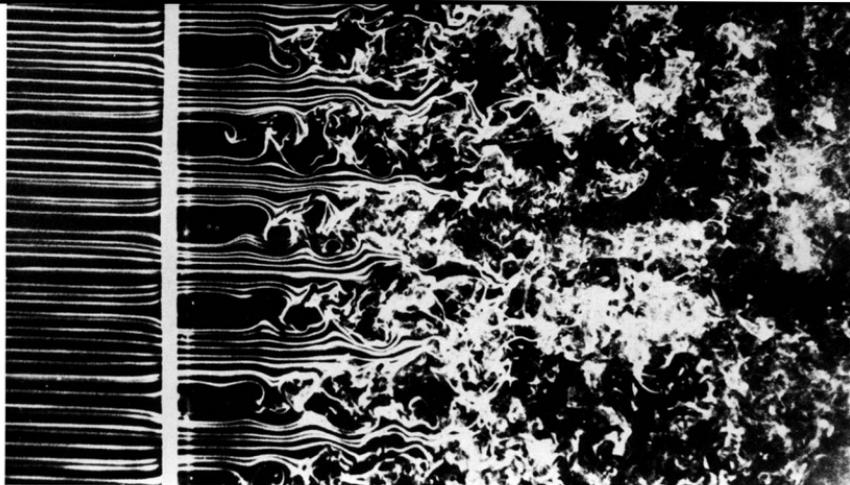
дателю. На равных расстояниях вдоль оси образуются утолщенные «пальцы» жидкости; они захватываются вверх поднимающейся стенкой и падают обратно в виде пленок, перпендикулярных оси цилиндра. [Karweit, Corrsin, 1975]

6. Турбулентность



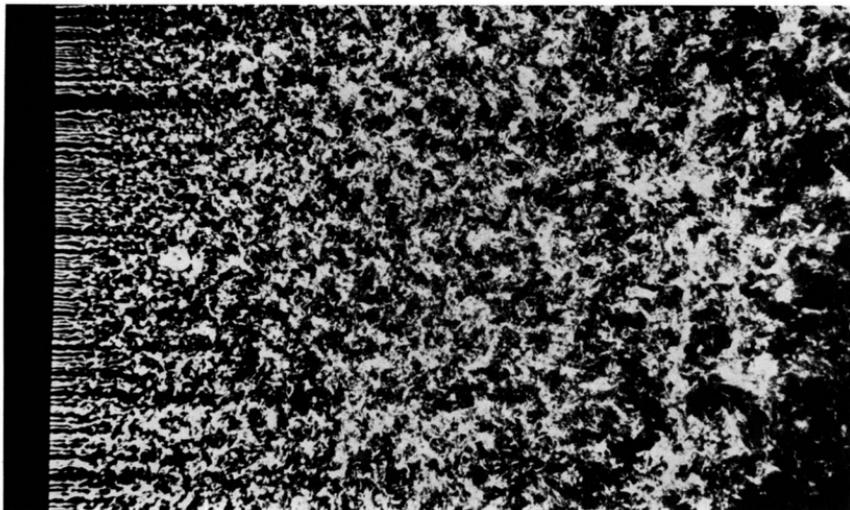
151. Дальний турбулентный след за пулей. Пуля, выстреленная в атмосферу со сверхзвуковой скоростью, находится слева от места выстрела на удалении нескольких сот диаметров следа. Эта быстро экспонированная теньевая фотография демонстрирует замечательную резкость нерегулярной

границы между сильно турбулентным следом за пулей и почти неподвижным воздухом во внешней безвихревой области. Фото сделано в Ballistic Research Laboratories, Aberdeen Proving Ground. [Corrsin, Kistler, 1954]



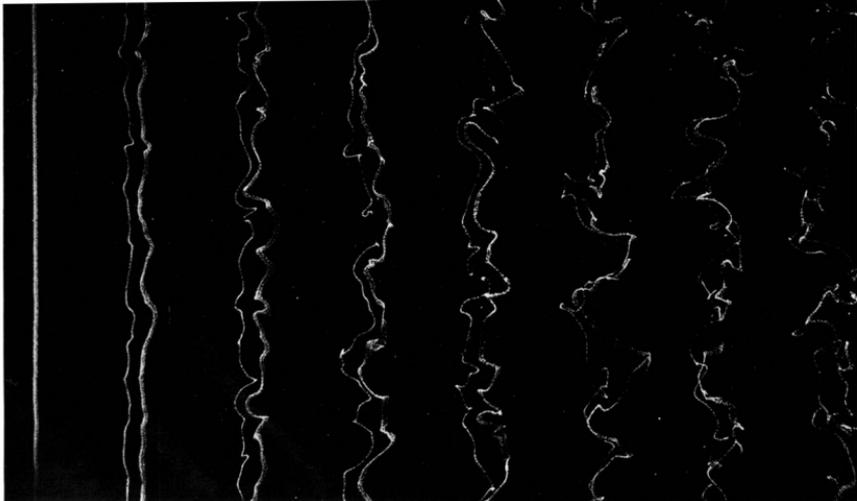
152. Порождение турбулентности решеткой. Дымовые проволочки демонстрируют прохождение однородного ламинарного потока через пластинку толщиной 1/16 дюйма с квадратными перфорациями размером 3/4 дюйма. Число Рейнольдса, рас-

считанное по однойдвойковому размеру ячейки решетки, равно 1500. Неустойчивость сдвиговых слоев приводит к развитию турбулентности вниз по потоку. Фото Thomas Corke, Hassan Nagib



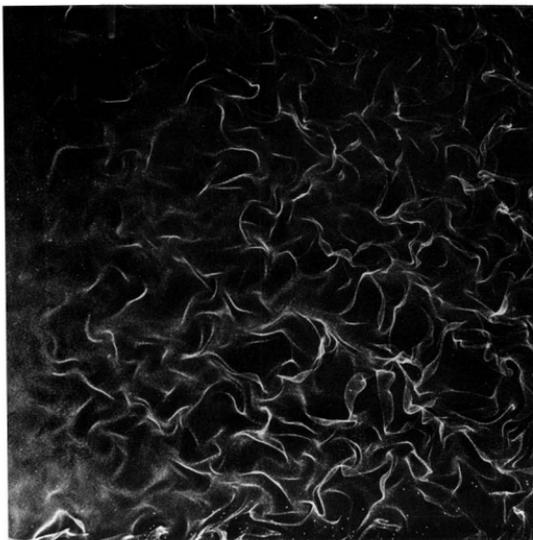
153. Однородная турбулентность за решеткой. За решеткой более частой, чем на предыдущем снимке, сливающиеся неустойчивые следы быстро образуют однородное поле. По мере затухания

вниз по потоку это поле становится полезным приближением идеализированной модели изотропной турбулентности. Фото Thomas Corke, Hassan Nagib



154. Растяжение материальных линий изотропной турбулентностью. Тонкая платиновая проволочка, видимая слева, протянута поперек гидродинамической трубы на расстоянии 18 размеров ячейки за турбулизирующей решеткой. Число Рейнольдса, рассчитанное по диаметру стержня решетки, равно

1360. Периодические электрические импульсы порождают двойные линии водородных пузырьков, растягивающиеся и сморщивающиеся (образующие складки) по мере того, как они переносятся вниз по потоку. [Corrsin, Karweit, 1969]

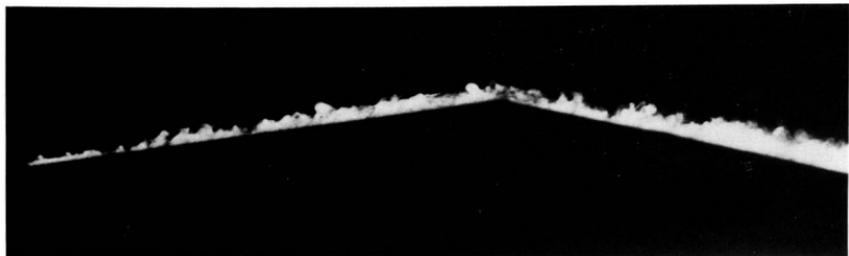


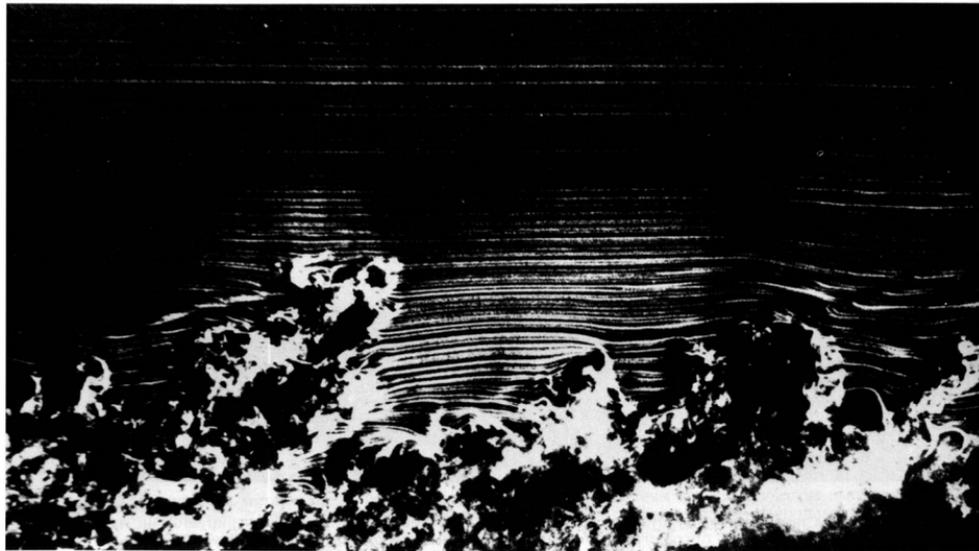
155. Сморщивание жидкой поверхности изотропной турбулентностью. Здесь платиновая проволочка порождает непрерывную плену водородных пузырьков. Она деформируется под влиянием почти изотропной турбулентности за решеткой. Считается, что более яркие линии соответствуют тем местам, где пелена видна со стороны гребня складки. Фото М. J. Karweit, М. S. E. Thesis, Университет Джона Гопкинса, 1968



156. Сравнение ламинарного и турбулентного пограничных слоев. Ламинарный пограничный слой, показанный на верхнем снимке, отрывается на вершине выпуклой поверхности (ср. с фото 38), тогда как турбулентный слой, показанный на нижнем снимке верхней пары, остается присоединенным;

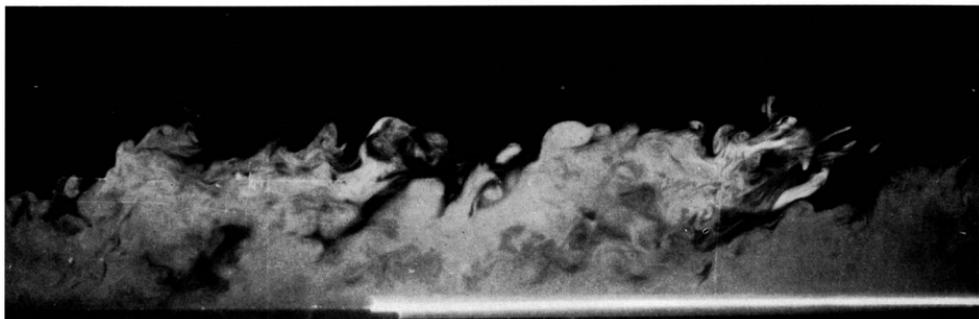
аналогичное поведение демонстрируется на двух снимках внизу для случая обтекания поверхности с ребром (ср. с фото 55–58, где изображено обтекание шара). Четыреххлористый титан нанесен на переднюю часть модели в аэродинамической трубе. [Head, 1982]





157. Турбулентный пограничный слой, вид сбоку. Здесь турбулентный пограничный слой развивается естественным образом на плоской пластинке длиной 3,3 м, подвешенной в аэродинамической трубе. Линии меченых частиц, идущие от дымовой проволоочки, поставленной вблизи острой перед-

ней кромки, освещаются вертикальным световым ножом. Число Рейнольдса, рассчитанное по толщине потери импульса, равно 3500. Хорошо видна перемежающаяся структура слоя в его внешней части. Фото Thomas Corke, Y. Guezennec, Hassan Nagib



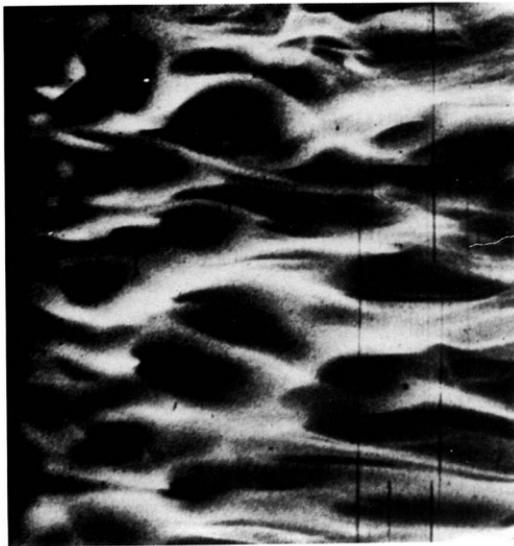
158. Турбулентный пограничный слой на стенке. Туман из мелких капелек масла введен внутрь ламинарного пограничного слоя через пол рабочей части аэродинамической трубы, после чего слой искусственно турбулизуется. Вертикальный свето-

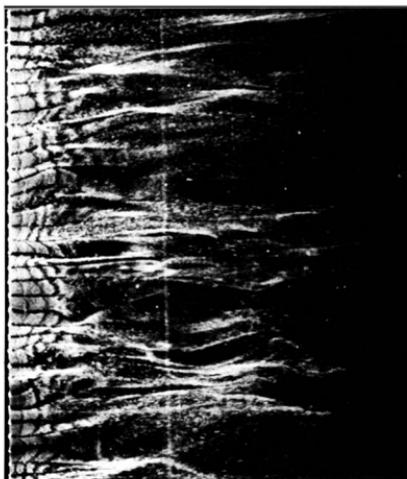
вой нож демонстрирует структуру течения на расстоянии 5,8 м вниз по потоку, где число Рейнольдса, рассчитанное по толщине потери импульса, равно примерно 4000. [Falco, 1977]

159. Подслоя турбулентного пограничного слоя. Взвесь алюминиевых частиц в потоке воды позволяет видеть полосы (области ускоренного и замедленного движений) внутри подслоя турбулентного пограничного слоя на плоской пластинке. Зеркало используется для одновременного получения вида сбоку. [Cantwell, Coles, Dimotakis, 1978]

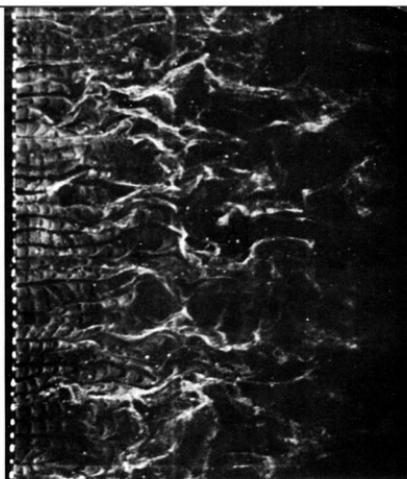


160. Деталь подслоя. Снятый крупным планом дым в турбулентном пограничном слое на полу аэродинамической трубы обнаруживает «карманы» и полосы в вязком подслое. [Falco, 1980]

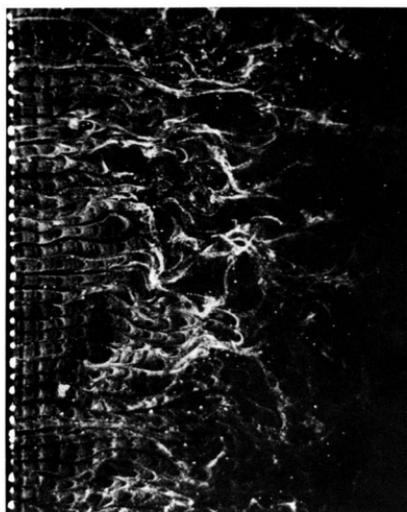




$y^+ = 2,7$



$y^+ = 38$



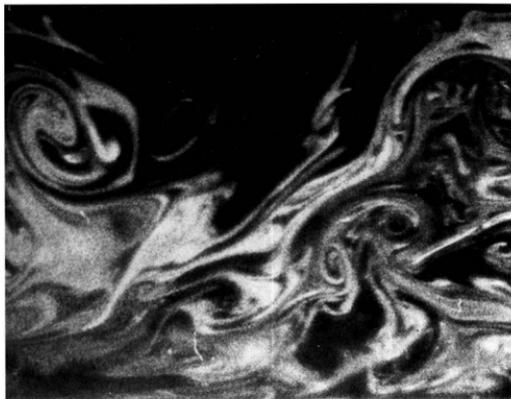
$y^+ = 101$



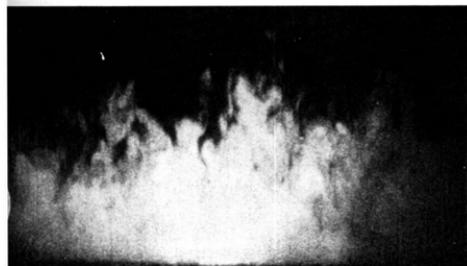
$y^+ = 407$

161. Структура турбулентного пограничного слоя. Последовательные срезы картины течения вблизи плоской пластинки в гидродинамической трубе визуализируются с помощью мелких водородных пузырьков, испускаемых периодически тонкой платиновой проволокой, видимой слева. Безразмерная высота $y^+ = y u_w / \nu$ расположения проволочки над пластинкой представлена через «переменные стенки», где $u_w = (\tau_w / \rho)^{1/2}$ – ско-

рость трения. Характерные полосы, соответствующие малым и высоким скоростям, ясно видимые в вязком подслое при $y^+ = 2,7$, становятся менее заметными дальше от поверхности и исчезают в логарифмической области при $y^+ = 101$. Видно, что в области следа, при $y^+ = 407$, турбулентность имеет перемежающийся характер и больший масштаб. [Kline, Reynolds, Schraub, Runstadler, 1967]

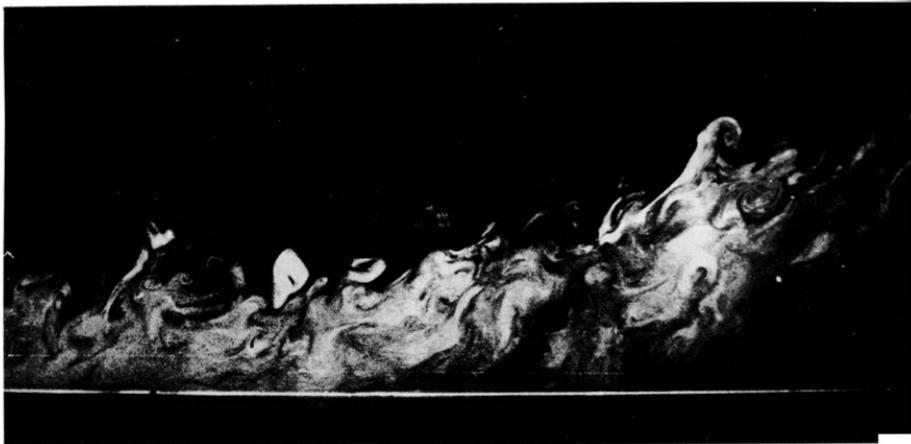
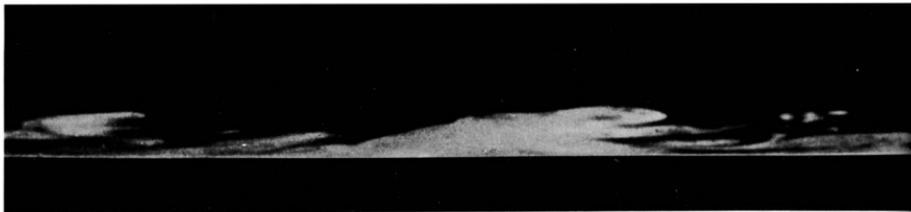


162. «Типичный вихрь» в турбулентном пограничном слое. Масляный туман освещается лазерным световым ножом, чтобы показать сбоку нижние две трети турбулентного пограничного слоя. Структура типа вихревого кольца справа чуть ниже и правее центра снимка, напоминающая разрезанный и наклонившийся влево гриб, дает пример того, что Фалько назвал «типичным вихрем». Его размеры соответствуют скорее пристеночному масштабу длины (фото 161), чем толщине пограничного слоя. Фото R. E. Falco



163. Косые поперечные сечения турбулентного пограничного слоя. Течение рассматривается спереди и визуализируется дымом, освещаемым световым ножом, который имеет наклон 45° вниз по потоку от стенки (левые снимки) и 45° вверх по потоку

(правые снимки). Число Рейнольдса, рассчитанное по толщине потери импульса, равно 600 для верхней пары снимков и 9400—для нижней. [Head, Bandyopadhyay, 1981]



164. Эффекты сильных градиентов давления. При сильном благоприятном градиенте давления (верхний снимок) турбулентный пограничный слой растягивается и в конечном итоге реламинируется;

при сильном обратном градиенте (нижний снимок) слой утолщается и отрывается. Фото R. E. Falco. [Head, 1982]

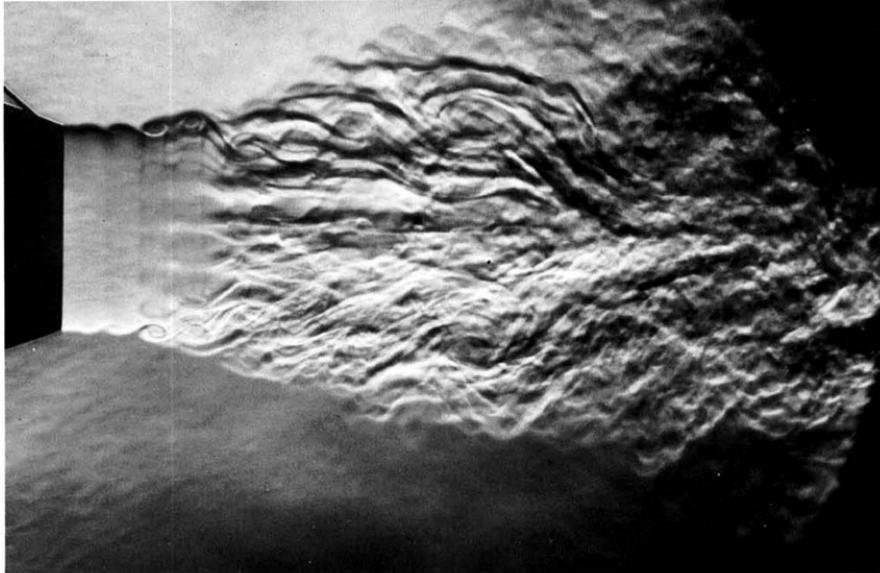


165. Турбулентный пограничный слой, набегающий на цилиндр. Когда турбулентный пограничный слой обтекает круговой цилиндр, установленный нормально к стенке, вихри во внешней области подвергаются быстрому искажению, а в области отрыва образуется перемежающаяся обратная струя. На фото 92 показано аналогичное течение с ламинарным пограничным слоем. Фото R. E. Falco



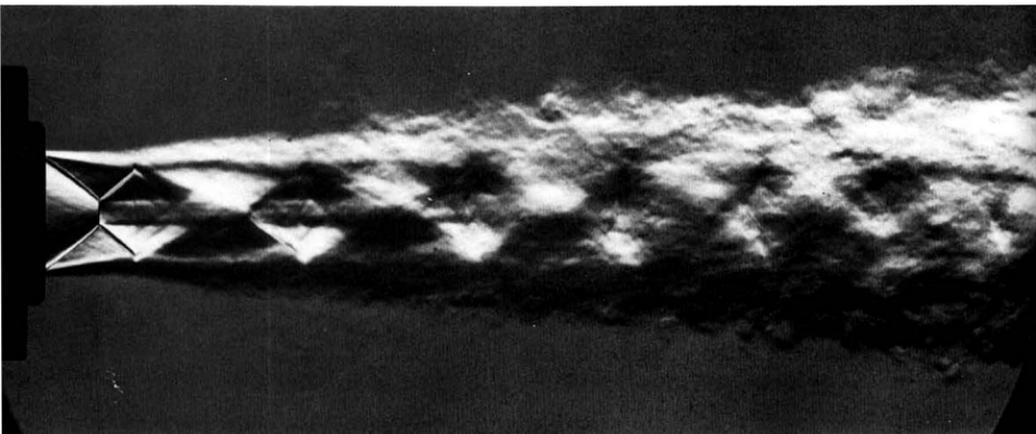
166. Турбулентная струя воды. Индуцированная лазером флуоресценция показывает картину внедрения жидкой струи в окружающую жидкость в плоскости симметрии осесимметричной водяной струи, направляемой сверху вниз в воду. Число

Рейнольдса равно приблизительно 2300. Пространственная разрешающая способность достаточна, чтобы выявить колмогоровский масштаб в нижней половине снимка. [Dimotakis, Lye, Papantoniou, 1981]



167. Дозвуковая струя, становящаяся турбулентной. Струя воздуха из сопла диаметром 5 см вытекает в окружающий воздух со скоростью 12 м/с. Ламинарная поверхность раздела становится не-

устойчивой, как и на фото 102, и в конечном итоге вся струя становится турбулентной. [Bradshaw, Ferriss, Johnson, 1964]



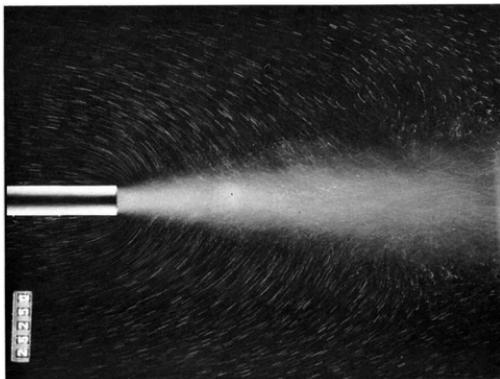
168. Сверхзвуковая струя, становящаяся турбулентной. При числе Маха 1,8 слегка перерасширенная круглая струя воздуха приспосабливается к окружающему воздуху через последовательность

косых и прямых ударных волн. Следы структуры с бриллиантообразными формами сохраняются и после того, как струя становится турбулентной. [Oertel, 1975]

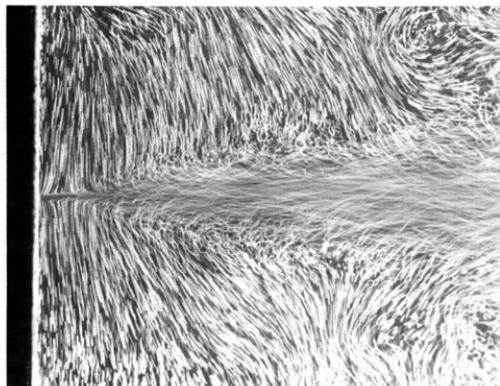
169. Захват жидкости плоской турбулентной струей. Длительная выдержка при съемке позволяет видеть осредненное течение для случая плоской струи подкрашенной воды, вытекающей в неподвижную воду со скоростью 100 см/с. Мелкие пузырьки воздуха маркируют линии тока медленного движения, индуцируемого струей в окружающей воде. Фото ONERA. [Werlé, 1974]

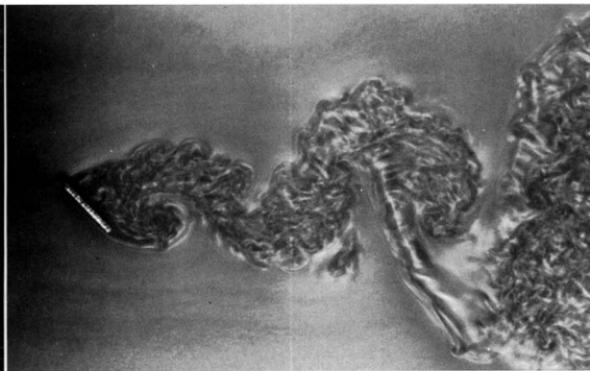


170. Захват жидкости осесимметричной турбулентной струей. Турбулентная струя подкрашенной воды вытекает из трубы диаметром 9 мм при скорости 200 см/с. В согласии с теорией пограничного слоя линии тока, маркируемые воздушными пузырьками в воде вне струи, представляют собой параболы вращения или параболы в плоском случае, показанном на предыдущем снимке. Фото ONERA. [Werlé, 1974]

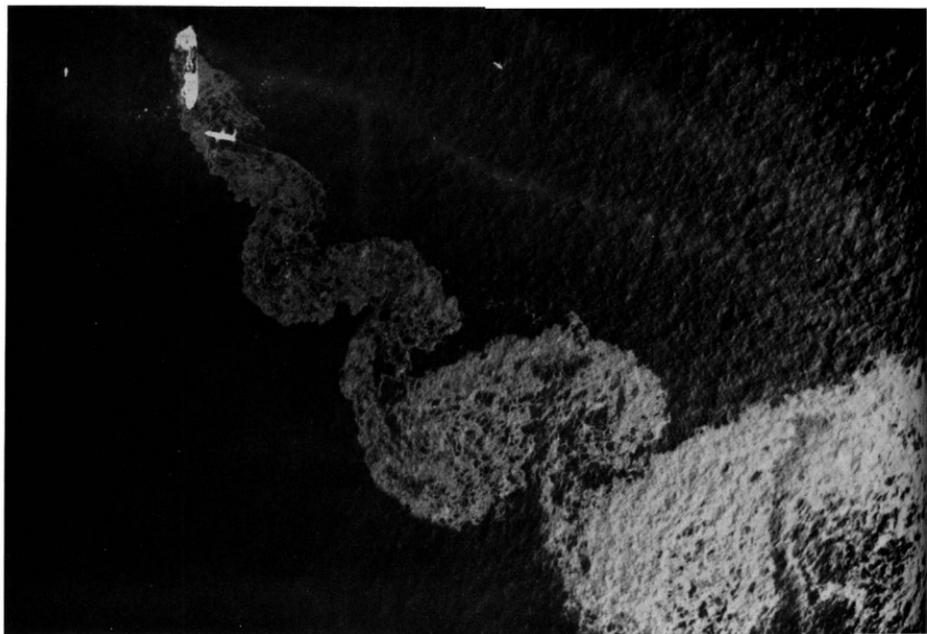


171. Плоская турбулентная струя, истекающая через щель в стенке. Струя чистой воды, вытекающей со скоростью 30 м/с через длинную щель в стенке, первоначально ламинарна. После перехода к турбулентности сама струя становится примерно такой же, как на фото 169, однако течение в окружающей воде из-за наличия стенки оказывается совершенно иным. Фото ONERA. [Werlé, 1974]





172. След за наклонной плоской пластинкой. След за пластинкой, обтекаемой под углом атаки 45° , турбулентен при числе Рейнольдса 4300. Алюминиевые хлопья, взвешенные в воде, выявляют характерную извилистую форму этого следа. [Cantwell, 1981]. Воспроизведено с разрешения из Annual Review of Fluid Mechanics, Vol. 13, © 1981 by Annual Reviews Inc.



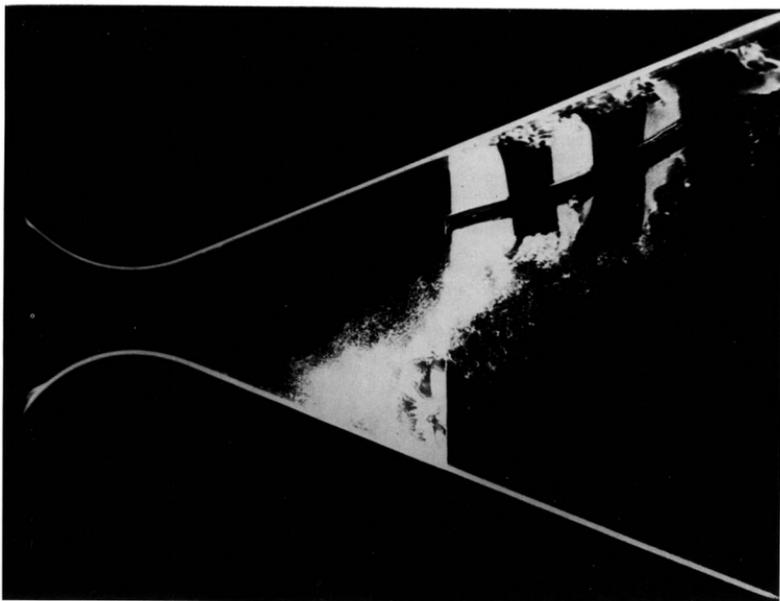
173. След за танкером, севшим на мель. Танкер «Argo Merchant» в 1976 г. сел на мель вблизи Нантакета. Вытекающая из него сырая нефть позволяет видеть, что судно оказалось наклоненным к морскому течению под углом 45° . Хотя число Рей-

нольдса равно примерно 10^7 , однако структура следа удивительно похожа на то, что показано на предыдущем снимке. Фото NASA, любезно предоставлено О. М. Griffin, Naval Research Laboratory



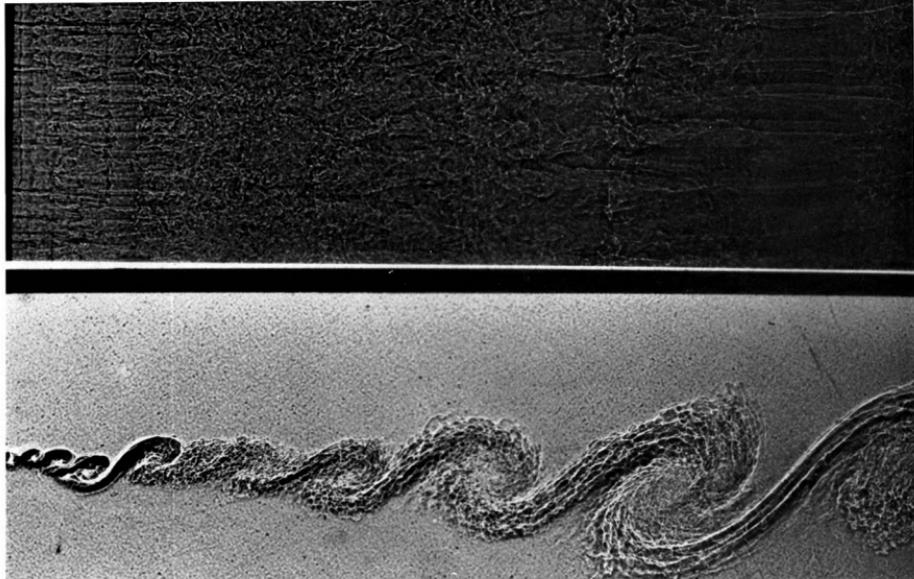
174. Турбулентный след за цилиндром. Лазерный световой нож прорезает след за круговым цилиндром при числе Рейнольдса 1770. Масляный туман демонстрирует мгновенную структуру течения, ох-

ватывая поле в 40 диаметров цилиндра по обе стороны от сечения, отстоящего на 50 диаметров вниз по потоку. Фото R. E. Falco



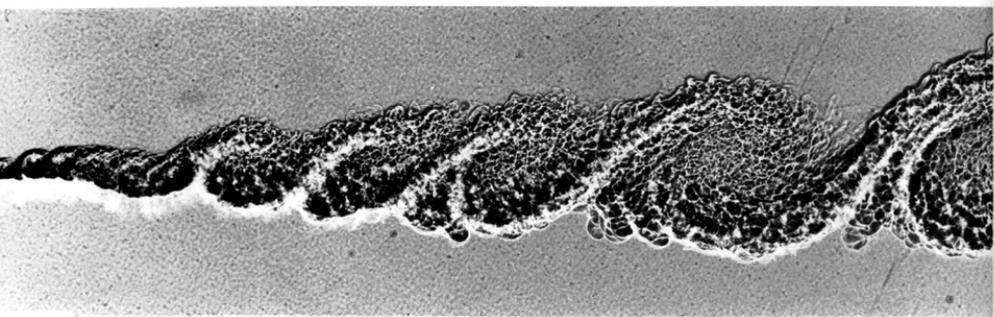
175. Отрывное течение в диффузоре. Проволочка, импульсивно выпускающая водородные пузырьки, протянута поперек диффузора в воде. Виден турбулентный пограничный слой, присоединенный к

верхней стенке; на нижней стенке имеет место отрыв и возникает рециркуляционная зона. [Kline, 1963]



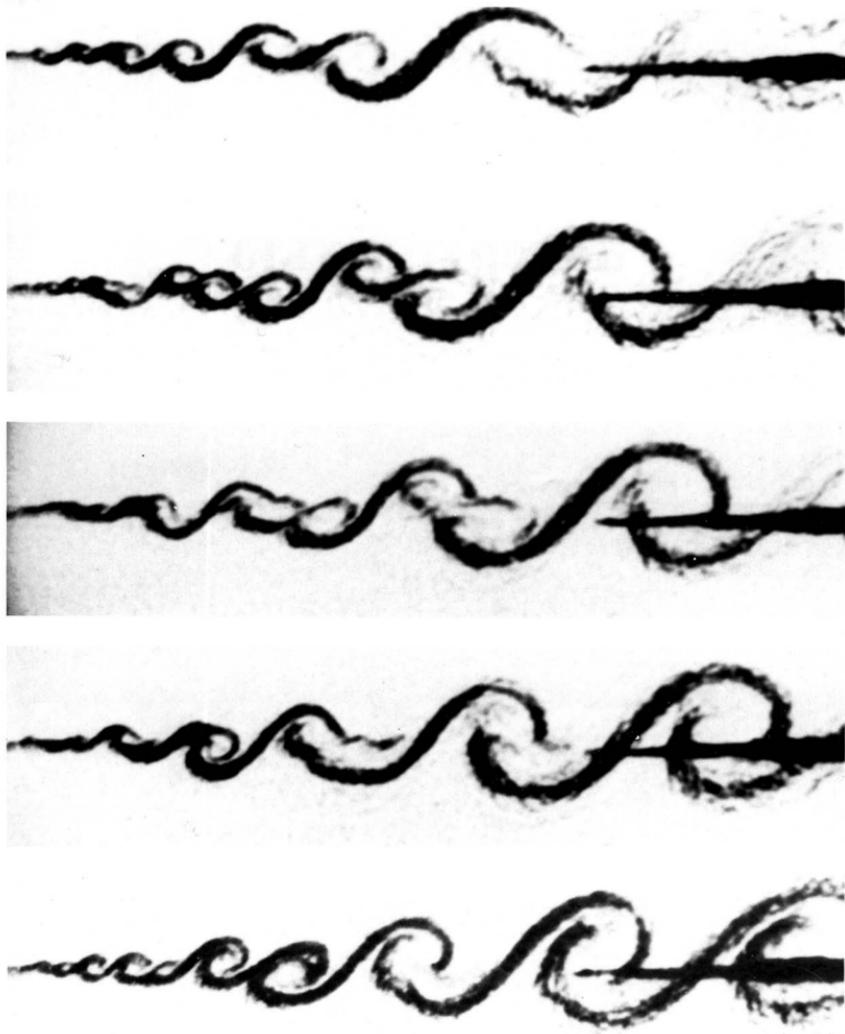
176. Крупномасштабная структура в турбулентном слое смешения. Азот, находящийся сверху и текущий со скоростью 1000 см/с, перемешивается под давлением 4 атм со смесью аргон-гелий, находящейся снизу, имеющей ту же плотность и текущей со скоростью 380 см/с. Сделанная искровым методом теневая фотография показывает одновременно течение в плане и сбоку, демонстрируя пространственную структуру больших вихрей. Поло-

ски, вытянутые вдоль потока, на фотографии течения в плане (здесь показана лишь половина снимка в ширину) соответствуют системе вторичных вихревых пар, ориентированных в направлении по потоку. Расстояние между ними в части слоя, расположенной вниз по потоку, больше, чем вблизи начала. Фото J. H. Konrad, Ph. D. Thesis, Калифорнийский технологический институт, 1976



177. Когерентная структура при большем числе Рейнольдса. Течение аналогично показанному на предыдущем снимке, но соответствует вдвое большему давлению. Увеличение числа Рейнольдса вдвое приводит к росту числа мелкомасштабных

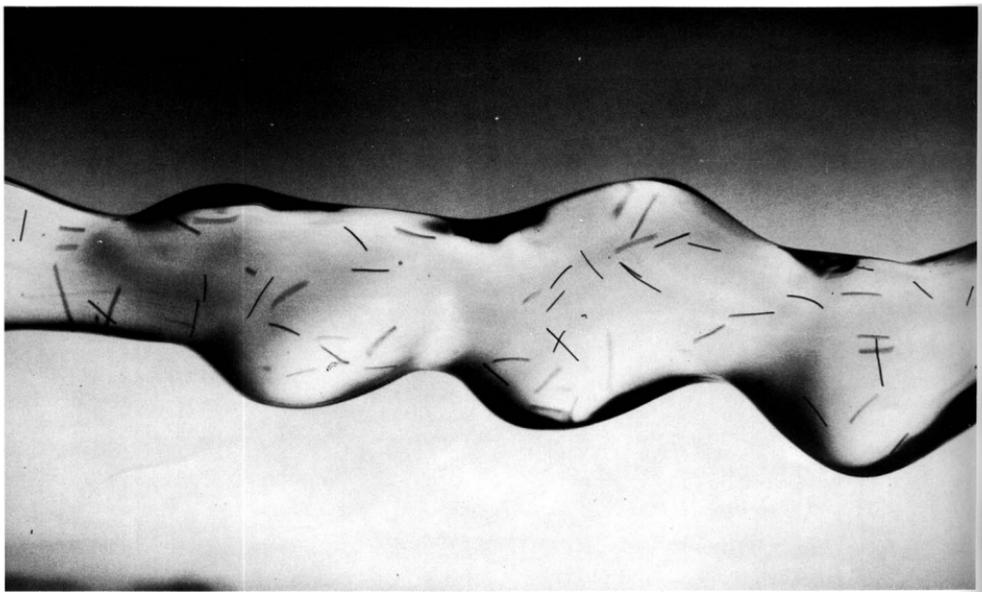
структур без существенного изменения крупномасштабной структуры. М. R. Rebollo, P. D. Thesis, Калифорнийский технологический институт, 1976. [Brown, Roshko, 1974]



178. Спаривание вихрей в слое смешения. Последовательность теневых фотографий демонстрирует смещение двух потоков одинаковой плотности под давлением 8 атм и при числе Рейнольдса 850 000. Азот течет со скоростью 10 м/с над смесью гелий-аргон, движущейся со скоростью 3,5 м/с. Справа

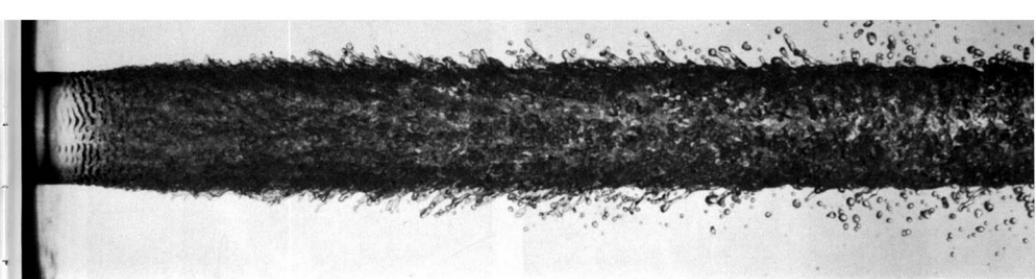
на кадрах виден датчик. Два разных вихря, видимые на верхнем снимке, спариваются в центре третьего вихря и превращаются в один большой вихрь на нижнем снимке. Фото L. Bernal, G. L. Brown, A. Roshko. [Roshko, 1976]

7. Течение со свободной поверхностью



179. Водяная струя перед распадом. Мелкие кусочки нитей из района (синтетический материал) диаметром примерно 0,015 мм и длиной менее 1 мм взвешены в воде и служат трассирующими элементами. Струя воды истекает через сопло диаметром 6 мм со скоростью 16 м/с в неподвижный воздух.

При характерном для этого течения большом числе Рейнольдса струя разрушается далеко вниз по течению за счет винтовой неустойчивости в отличие от осесимметричной формы потери устойчивости, проявляющейся при малых скоростях (фото 122). [Нойт, Taylor, 1982]



180. Водяная струя, вытекающая в неподвижный воздух. Вода вытекает из сопла диаметром 6 мм со скоростью 25 м/с. Как видно, на своем начальном участке струя ламинарна, но уже на расстоянии, равном диаметру струи, появляются осесим-

метричные волны неустойчивости. В дальнейшем эти волны хаотически разрастаются, и процесс завершается выбросом мелких капель. [Hoyt, Taylor, 1977]



181. Водяная струя в коаксиальном потоке воздуха. На течение в начальном участке струи поток окружающего воздуха не влияет; однако, как показано на снимке, на расстоянии 238 диаметров вниз по потоку винтовая неустойчивость струи оказывает-

ся подавленной. Струя вытекает из сопла со скоростью 27 м/с, а скорость воздушного потока составляет на снимках сверху вниз соответственно 2, 11 и 22 м/с. [Hoyt, Taylor, 1977]

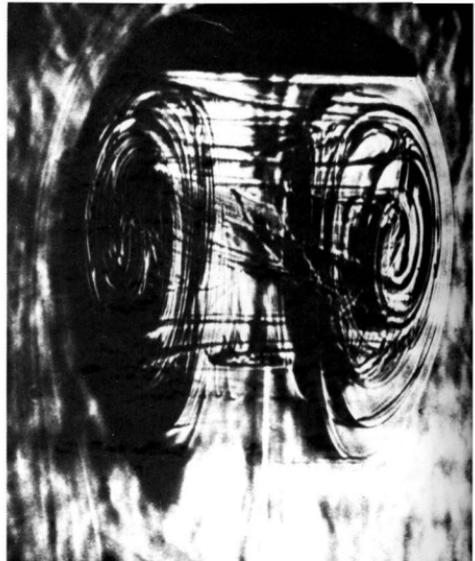


182. Пузырь, поднимающийся в ньютоновской жидкости. Воздушный пузырь объемом $40,6 \text{ см}^3$ поднимается в силиконовом масле вдоль оси вертикальной трубы диаметром $8,2 \text{ см}$. Влияние инерции и поверхностного натяжения пренебрежимо мало, число Рейнольдса меньше $0,1$, так что в неограниченной среде пузырь был бы сферическим. Здесь же наличие стенок приводит к некоторому удлинению пузыря, однако и сам пузырь, и все поле течения, визуализируемое с помощью освещенных частичек магнезита, симметричны относительно горизонтальной срединной плоскости пузыря. [Coutanceau, Thizon, 1981]



183. Пузырь, поднимающийся в неньютоновской жидкости. Пузырь объемом 13 см^3 поднимается при числе Рейнольдса, меньшем $0,1$, в вертикальной трубе диаметром $8,2 \text{ см}$ (на снимке не видна), заполненной $3,5\%$ -ным водным раствором окиси полиэтилена. Эта жидкость обладает выраженными неньютоновскими свойствами – вязкостью, быстро уменьшающейся с ростом напряжения сдвига, и значительной упругостью. Пузырь теряет симметрию передней и задней частей, которую он имел в ньютоновской жидкости, и становится заостренным в хвостовой части. Фото М. Coutanceau, P. Thizon. [van Wijngaarden, Vossers, 1978]

184. Пузырь со сферической головкой и ламинарным следом. След пузыря невидим ни для невооруженного глаза, ни для камеры. Снимок, сделанный шликрен-методом при числе Рейнольдса, рассчитанном по радиусу эквивалентной сферы и равном 90 , показывает ламинарный тороидальный вихрь, закручивающийся под пузырьем со сферической головкой, поднимающимся в большом сосуде с минеральным маслом. Пузырь содержит 55 см^3 воздуха. [Wegener, Parlange, 1973]. Воспроизведено с разрешения из Annual Review of Fluid Mechanics, Vol. 5. © 1973, by Annual Reviews Inc.



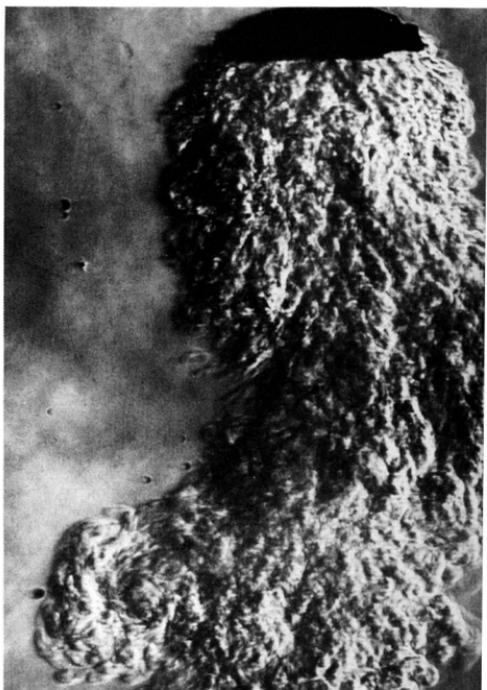


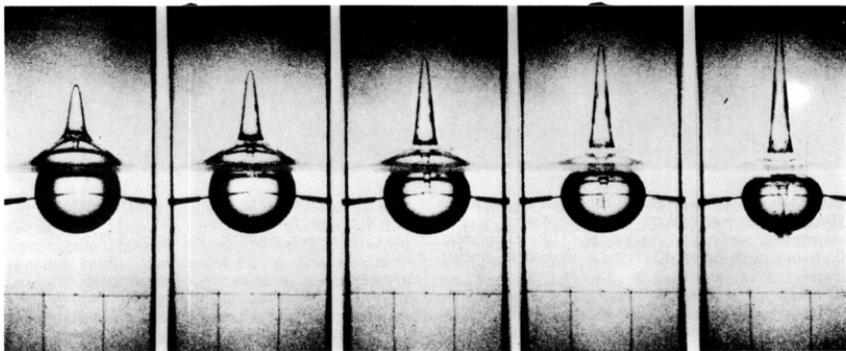
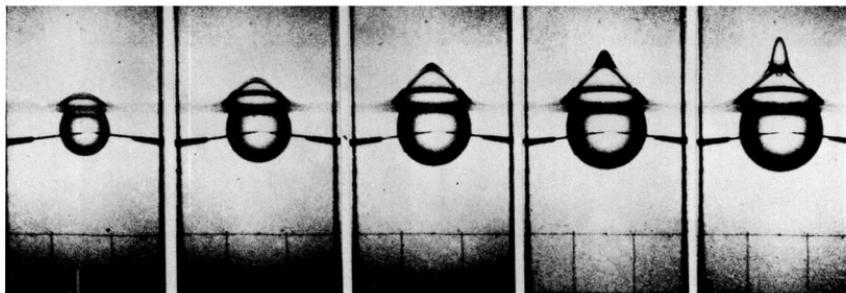
185. Пузырь со сферической головкой и «вобкам». Пузыри, содержащие 50–100 см³ воздуха, поднимаются в минеральном масле. При скоростях, больших примерно 40 см/с, и вязкости, превы-



шающей 200 сПз, за всем нижним краем пузыря или за его частью начинает тянуться тонкая пелена газа. [Wegener, Sundell, Parlange, 1971]

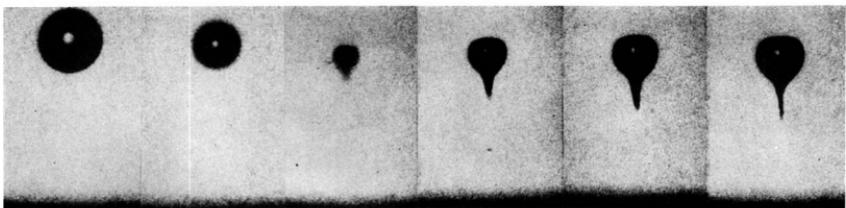
186. Пузырь со сферической головкой и турбулентным следом. На снимке показан пузырь, содержащий 11 см³ воздуха и поднимающийся в воде. При числе Рейнольдса, рассчитанном по эквивалентному радиусу пузыря и равном 5100, снимок шлирен-методом выявляет вполне турбулизированный след. Граница между турбулентной и ламинарной жидкостью по своему виду сравнима с тем, что показано на фото 151. [Wegener, Sundell, Parlange, 1971]





187. Коллапс пузыря вблизи свободной поверхности. Эта серия последовательных снимков показывает рост и коллапс пузыря пара в воде вблизи свободной поверхности вода – воздух. Пузырь был создан посредством высоковольтного искрового разряда между двумя датчиками. Во время роста и коллапса пузыря в воздух проникает снизу заостренная струйка воды, уравновешенная другой

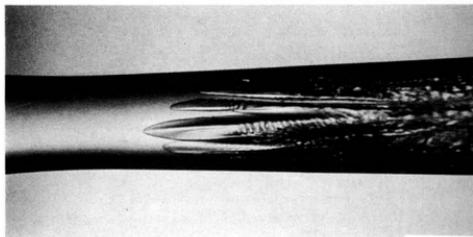
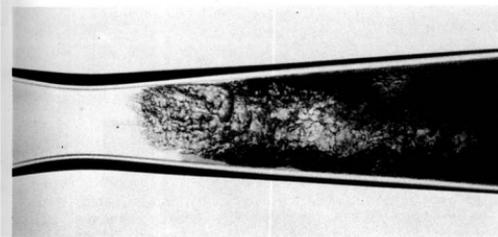
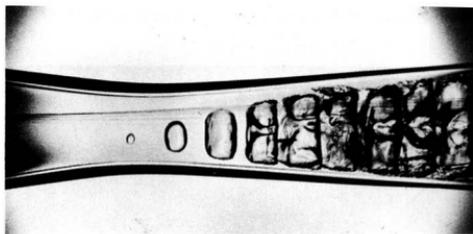
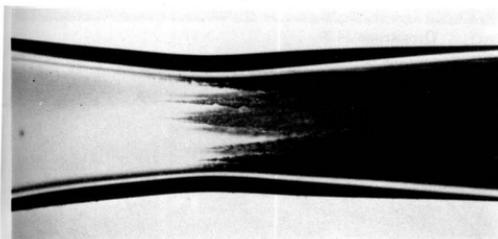
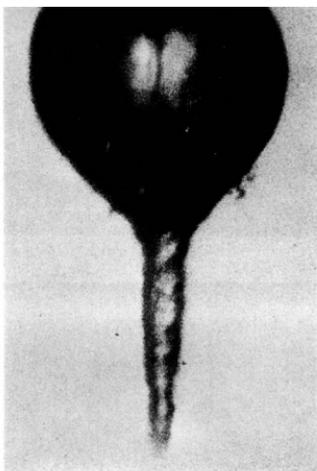
тонкой водяной стружкой, которая при коллапсе внедряется в пузырь сверху вниз. Для исключения эффектов плавучести эксперимент выполнялся в режиме свободного падения. Скорость съемки составляет 11 000 кадров в секунду, а квадратная сетка в нижней части каждого кадра имеет сторону ячейки 25 мм. [Blake, Gibson, 1981]



188. Коллапс пузыря вблизи стенки. Эта серия последовательных снимков демонстрирует коллапс сферического пузыря в неподвижной воде вблизи плоской твердой поверхности (темная размытая граница в нижней части каждого кадра). Пузырь создается на расстоянии 4,5 мм от стенки при помощи сфокусированного пучка света от рубинового лазера и начинает коллапсировать после своего

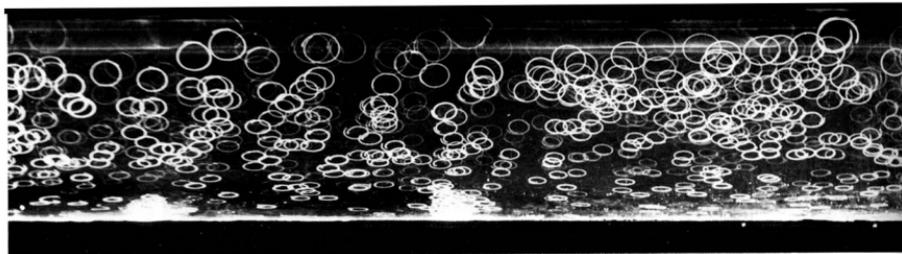
расширения до максимального радиуса, равного 1,1 мм. Процесс фотографировался со скоростью 75 000 кадров в секунду. Освещение осуществлялось сзади сквозь пластинку из матового стекла. Светлое пятно в середине пузыря получилось в результате прохождения света, оставшегося неотклоненным. [Lauterborn, 1980]

189. Струйка, выбрасываемая из пузыря вблизи стенки. На предыдущей серии последовательных снимков показан эффект образования высокоскоростной струйки, направленной вниз и образующейся на вершине пузыря при его коллапсе. В показанном здесь увеличенном изображении эта струйка просматривается как тонкая темная вертикальная линия, проходящая через светлое пятно в середине пузыря. Пройдя через почти пустую камеру, струйка ударяет о ее дно и увлекает за собой границу пузыря, образуя направленную в сторону стенки тонкую полость. Считается, что струйка простирается намного дальше, чем эта полость, и именно она является причиной кавитационной эрозии на поверхности твердой стенки. Горизонтальный диаметр пузыря составляет примерно 2 мм. [Lauterborn, 1980]

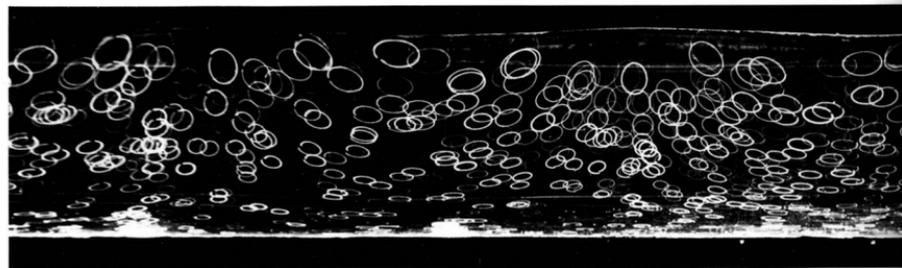


190. Кавитация в высокоскоростном потоке воды в сопле. Переход от простой капельной жидкости к сильно ускоренной двухфазной системе происходит в горловине сопла при расширении и особенно эффективно в подогретой жидкости. На верхнем левом снимке перегретая вода с температурой 204°C обнаруживает регулярные признаки начала кавитации с ядрами на стенке. Верхний правый снимок демонстрирует случай, когда ядер на стенке нет и

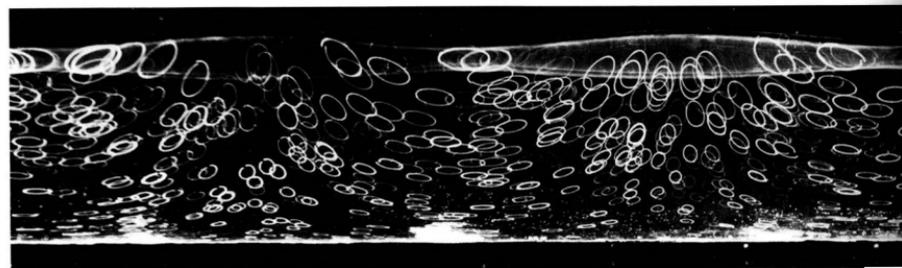
кавитация инициируется одиночными пузырьками в ядре потока, что приводит к периодическим колебаниям давления. На снимке внизу слева повышение частоты флуктуаций связано с задержкой кипения воды при температуре 133°C. Внизу справа показана кавитация в воде, содержащей воздух, при комнатной температуре. Фото Е. Klein, взято из DFG-Forschungsberichte, любезно предоставлено Н. Fiedler



Нет отражений



Отражение 24 %



Отражение 38 %

191. Траектории частиц в плоских периодических волнах на воде. Два пуга волн одинаковой частоты, движущихся в противоположных направлениях, были созданы бегущей волной, пришедшей слева и частично отраженной поглощающим барьером. Верхний снимок показывает чистую бегущую волну при отсутствии отражения. Амплитуда этой волны составляет 4% ее длины, а глубина воды равна 22% длины волны. Белые частицы, взвешенные в воде, фотографируются с выдержкой в один период. Траектории частиц имеют практически форму эллипсов, проходимых в направлении по часовой стрелке; у свободной поверхности они близки к окружностям и все более сплющиваются

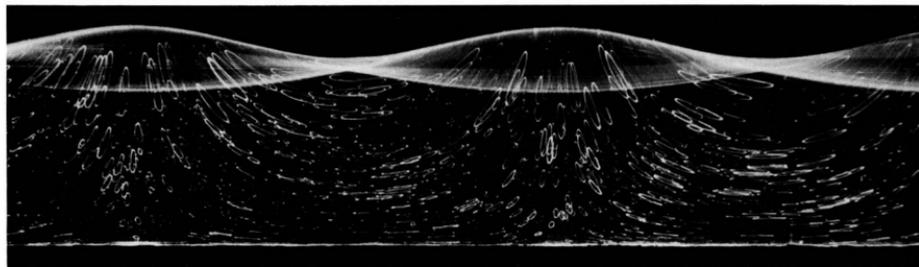
по мере приближения к дну. Некоторые кривые, имеющие форму незамкнутых петель, свидетельствуют о медленном дрейфе вблизи поверхности вправо и вблизи дна влево. При увеличении степени отражения орбиты становятся все более вытянутыми и их наклон возрастает. Полное отражение дает чистую стоячую волну, показанную на последнем снимке; здесь траектории частиц совпадают с линиями тока. Верхняя и нижняя огибающие водной поверхности на этом снимке показывают, что вертикальное движение в узлах не исчезает. [Wallet, Ruellan, 1950], любезно предоставлено M. C. Vasseur



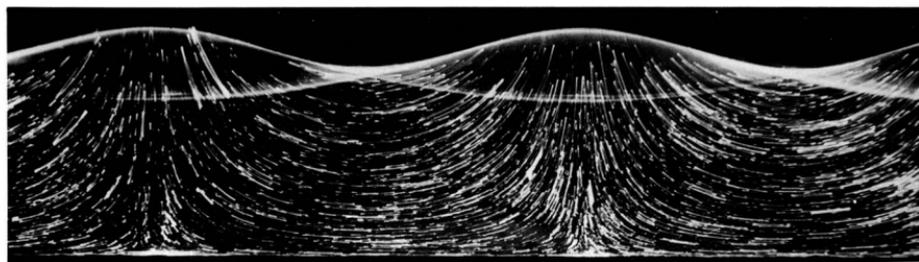
Отражение 53 %



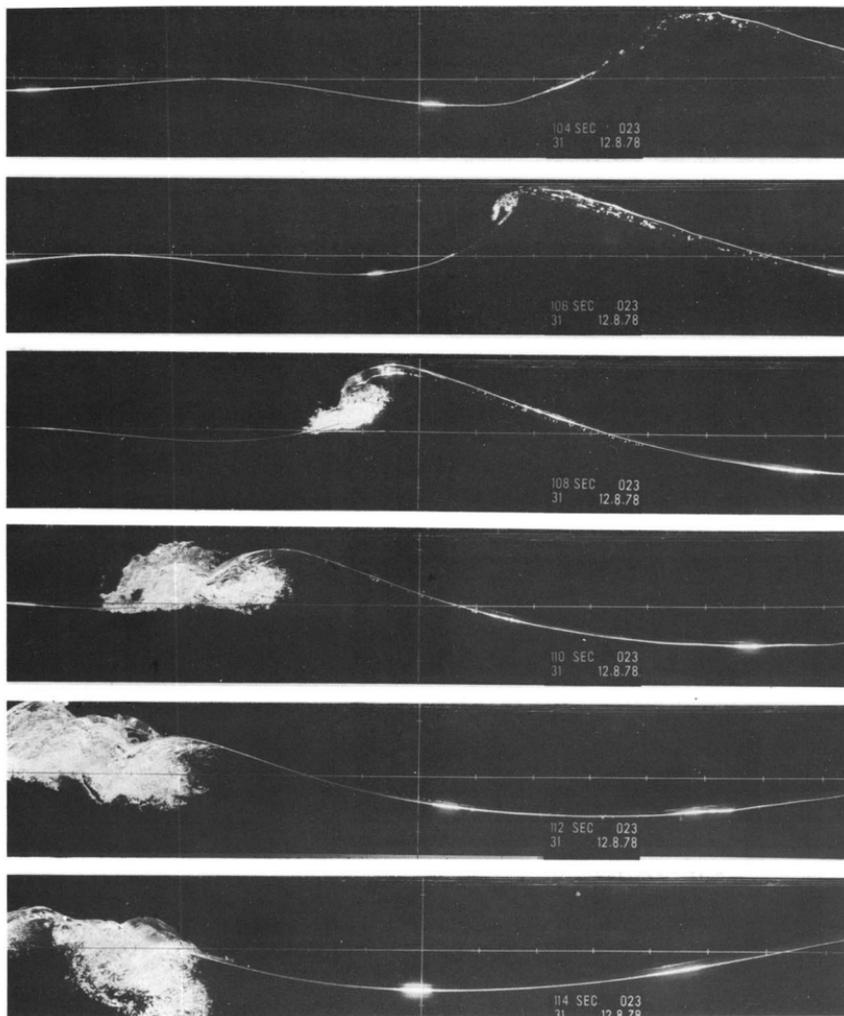
Отражение 71 %



Отражение 85 %

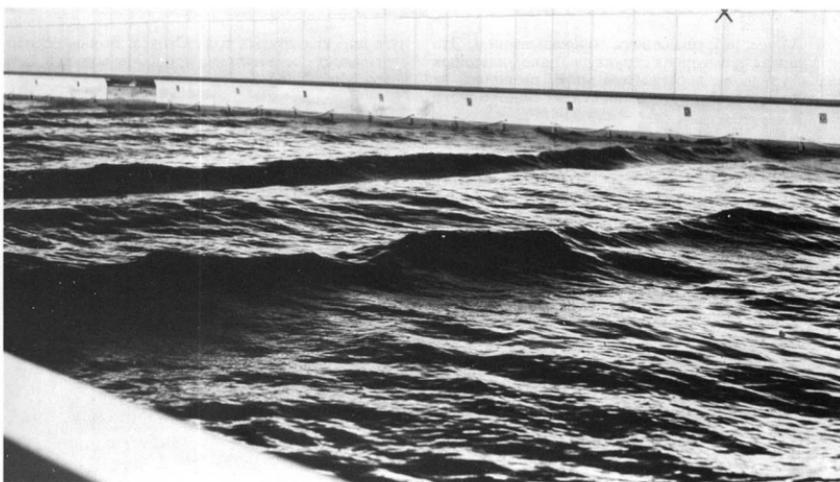


Отражение 100



192. Обрушение плоской волны на воде. Волнопродуктор в гидроканале запрограммирован так, что он генерирует спектр длин волн, устроенный следующим образом. Фазы 32 компонент частот распределены так, что максимумы комбинируются при достижении пересечения координатных линий. Волна движется справа налево в воде глубиной 60 см. Интервал времени между соседними

кадрами равен 1/12 с (значения времени, приведенные на снимках, соответствуют эквивалентному масштабу времени для моделируемого натурального явления). Максимальная высота гребня над средним уровнем воды составляет 13 см. Фото из J. Taylor and the Edinburgh University Wave Power Project



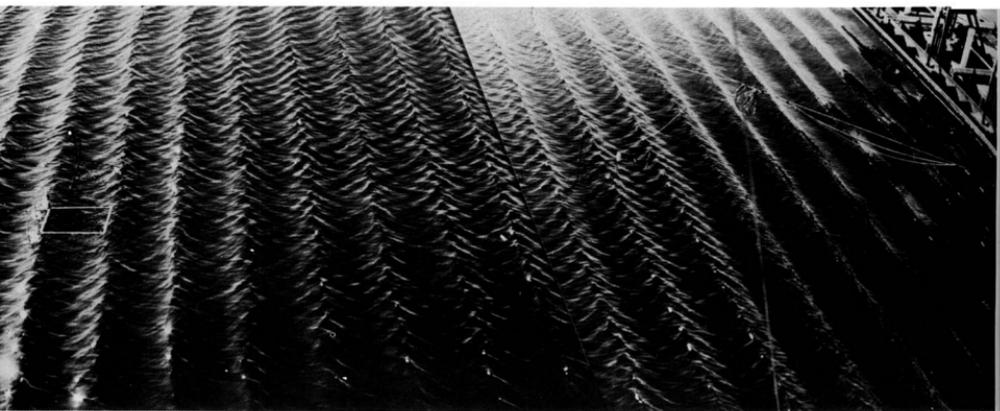
193. Распад цуга волн Стокса. Колеблющийся плунжер генерирует цуг волн с длиной волны 2,3 м в воде глубиной 7,6 м. Волны в большом опытном бассейне корабельного отделения Национальной физической лаборатории движутся в направлении от наблюдателя. Верхний снимок, сделанный вблизи волнопродуктора, демонстрирует структуру плоских волн, регулярную, если не учитывать мелкомасштабную рябь. На нижнем снимке, сле-

данном примерно на расстоянии 60 м (28 длин волн) дальше вдоль по бассейну, тот же цуг волн претерпел уже существенное искажение. Неустойчивость была инициирована путем наложения на движение волнопродуктора небольшой модуляции с частотами из боковой полосы неустойчивости; однако точно такой же распад возникает и естественным образом, но на несколько большем удалении. Фото J. E. Feir. [Benjamin, 1967]



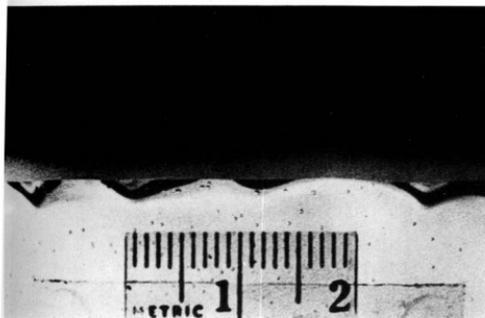
194. Волны, разрушающиеся опрокидыванием. Эта регулярная трехмерная структура, напоминающая структуру волн в открытом море, развилась за счет нелинейной неустойчивости из однородного

пучка плоских крутых волн Стокса. Волны распространяются слева направо при длине волны 0,75 м. Фото Ming-Yang Su

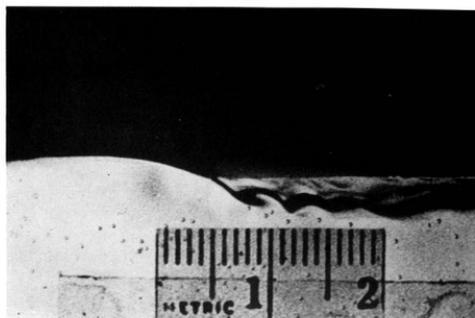


195. Общая картина эволюции волн. Крутые волны Стокса с длиной волны 0,75 м генерируются в большом открытом бассейне, имеющем глубину 1 м, волнопродуктором, расположенным справа. По мере продвижения волн влево неустойчивость

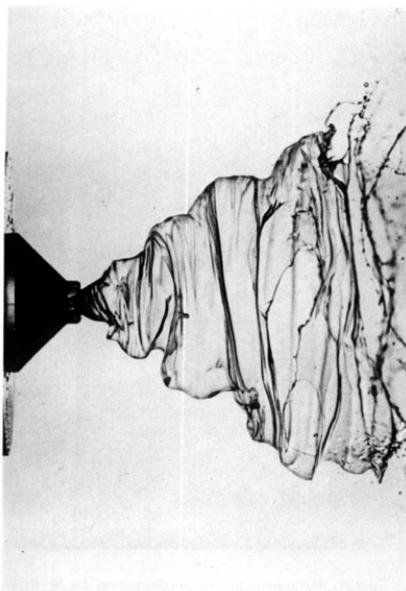
превращает их в трехмерные волны, разрушающиеся опрокидыванием, показанные более крупным планом на предыдущем снимке. Фото Ming-Yang Su



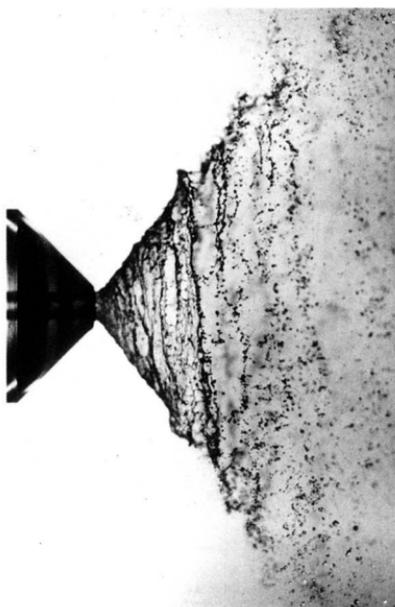
96. Капиллярные волны. В противоположность гравитационным волнам плоские капиллярные волны теоретически могут иметь заостренные впадины и пологие гребни. Показанные здесь профили образованы ветром, дующим со скоростью 12 узлов (~ 6 м/с) над гидродинамическим каналом. Schooley, 1958], с любезного разрешения Naval Research Laboratory



197. Капиллярно-гравитационные волны. При ветре в 16 узлов впереди длинной гравитационной волны движется цуг коротких капиллярных волн. Тонкая пленка воды задерживается стенкой канала. Масштаб на фото 196 и 197 равен 2 см. [Schooley, 1958], с любезного разрешения Naval Research Laboratory



198. Распыление при истечении жидкости из сопла. Глицерин вытекает из сопла в виде тонкой конической струи. Как и на фото 147, возмущения воз-

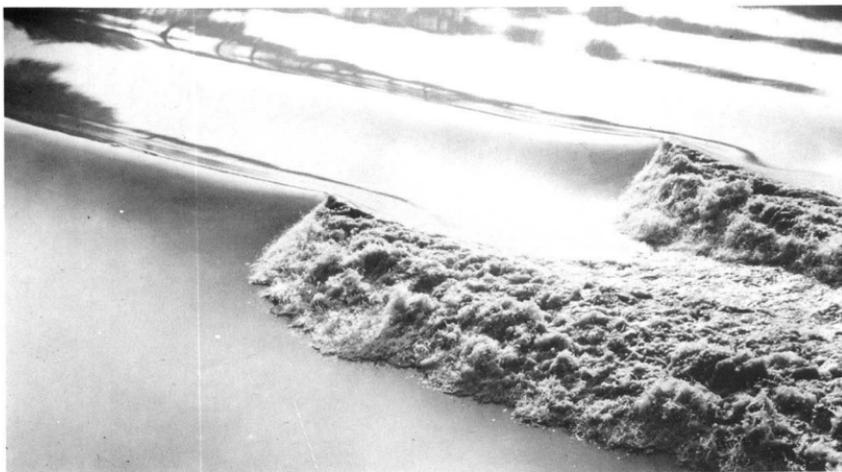


стают, пока пелена не распадается, превращаясь в капельки. Фото Eugen Klein, любезно предоставлено Н. Fiedler



199. Турбулентная бора на реке Северн. Когда сильный прилив проходит много километров по мелководью, фронт приливной волны, т. е. головная часть приливного паводка, становится все круче. Он может образовать «бору», т. е. подвижную форму гидравлического прыжка. Наиболее мощные боры возникают в устье рек Хугли в Ин-

дии и Цяньтан в Китае. Сильные боры встречаются также на Амазонке, Сене и Северне. Бора на Северне показана здесь в турбулентном состоянии во время прохождения отмели Родли-Сэндс против местечка Фрэмилтоуд с нормальной глубиной воды в 20 см. Фото D. H. Peregrine



200. Волновая бора на реке Северн. Характер боры зависит от отношения глубин воды перед и за ней. Если глубина воды за борой менее чем в 1,6 раза превышает глубину перед нею, то на фронте боры возникают волновые движения. Волны уносят энергию от фронта боры и, таким образом, могут

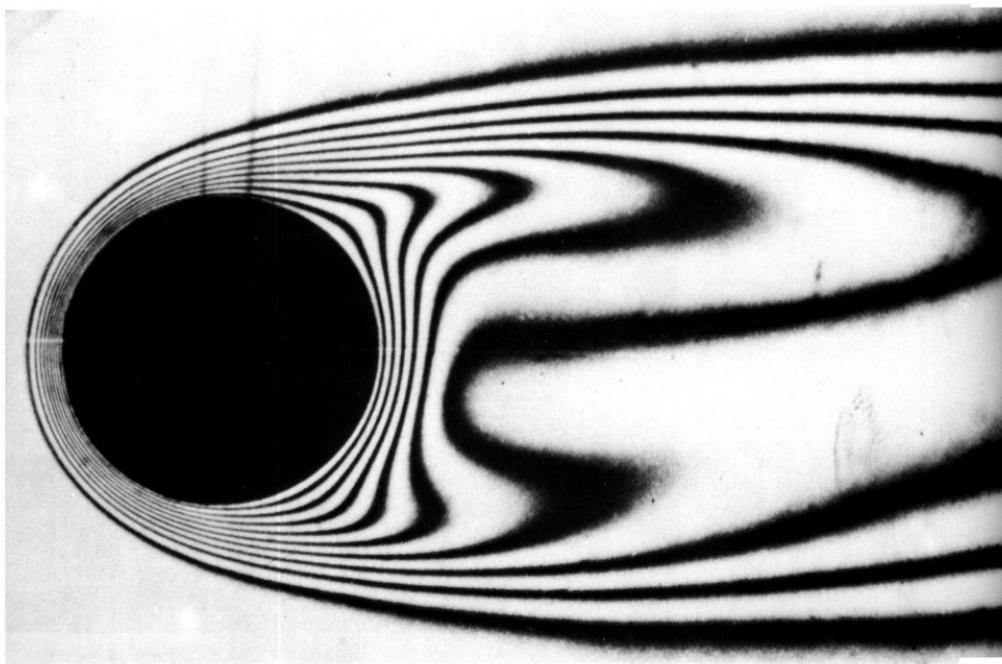
исключить необходимость турбулентной диссипации энергии. Волновая бора, показанная на снимке, сфотографирована на реке Северн у Минстер-уорта. Глубина воды в середине реки (левая часть снимка) составляет около 2 м, а вблизи банки (справа) – мелководье. Фото D. H. Peregrine



201. Конфигурация волн, создаваемая кораблем. Снимок, сделанный с воздуха непосредственно над кораблем, показывает не только носовую волну и турбулентный след, но и асимптотическую структуру, теоретически установленную в 1887 г. Кельвином. В согласии с теорией волновая область

ограничена углом $19,5^\circ$ с каждой стороны от направления движения корабля, причем виртуальная вершина этого угла смещена приблизительно на одну длину корпуса перед носом корабля. [Newman, 1970]

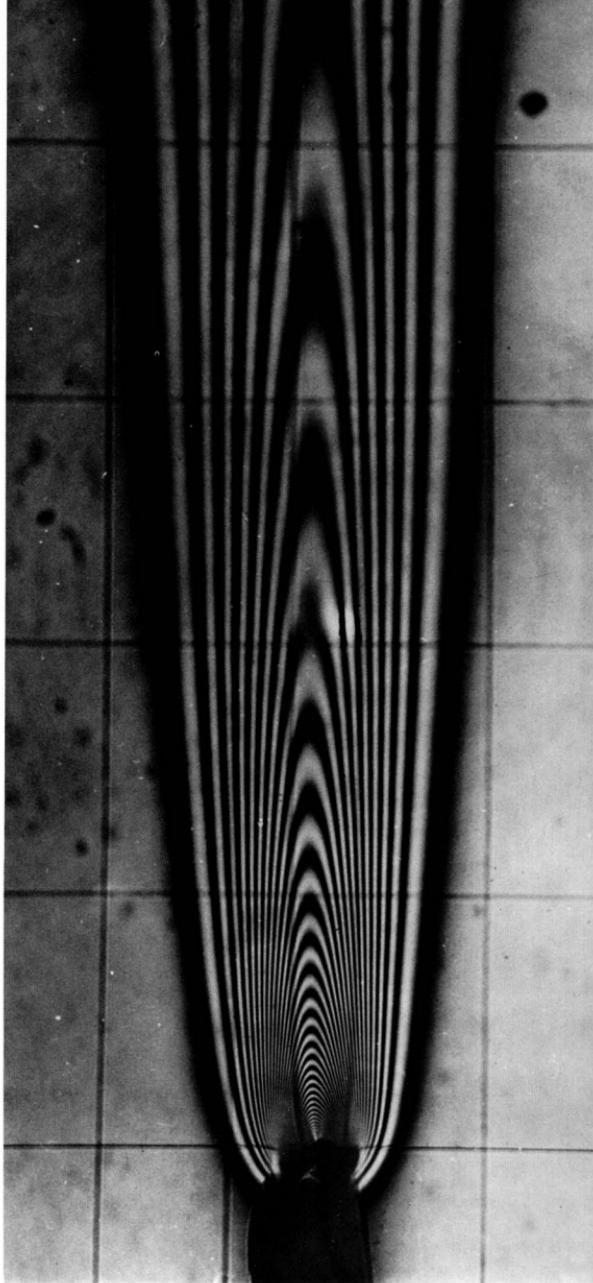
8. Свободная конвекция

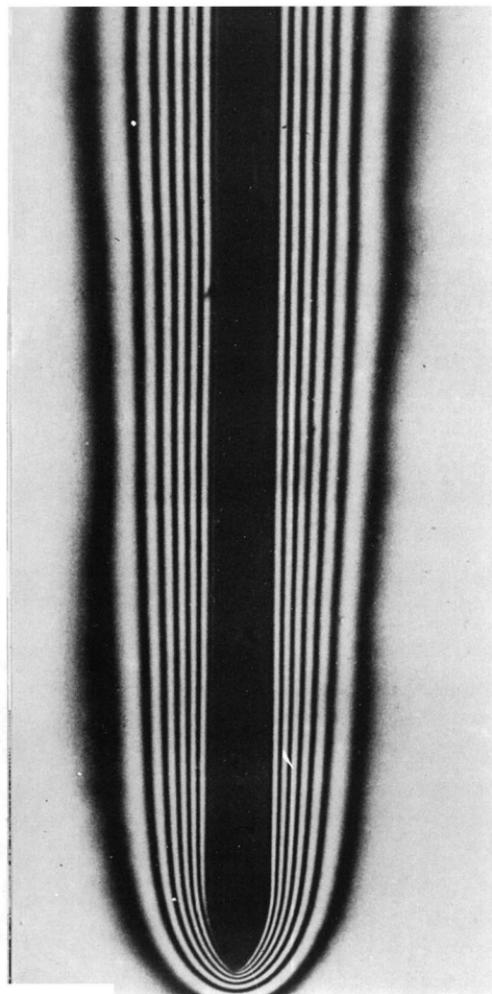


202. Охлаждение цилиндра в потоке. Интерферометр Маха-Цендера демонстрирует изотермы в сравнительно толстом тепловом пограничном слое при числе Рейнольдса 120, а также отрывной ламинарный след. Нагретый медный цилиндр диа-

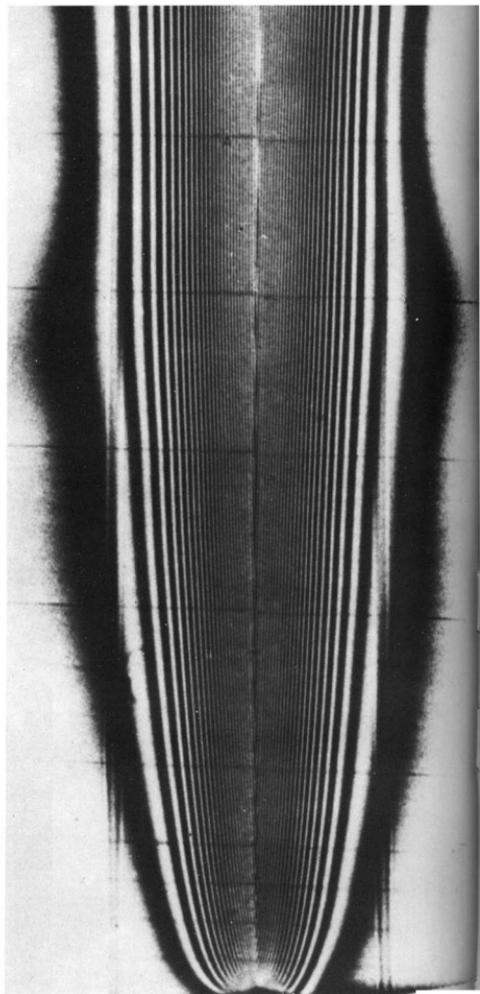
метром 1 дюйм пересекает вполне развитое ламинарное течение воздуха в прямоугольном канале. Асимметрия в вертикальном направлении получается из-за свободной конвекции. [Eckert, Soehngen, 1952]

203. Плоский конвективный факел, поднимающийся от нагретой горизонтальной проволоки. Тонкая проволока длиной 6 дюймов нагревается электрическим током в атмосферном воздухе. Каждая полоса на этой интерферограмме соответствует перепаду температур $4,4^{\circ}\text{C}$. Проволочки отсчетной координатной сетки образуют прямоугольники $1/2$ на $1/4$ дюйма. В хорошем согласии с автоматическими решениями уравнений пограничного слоя ширина факела растет пропорционально высоте в степени $2/5$. [Gebhart, Pera, Schorr, 1970]

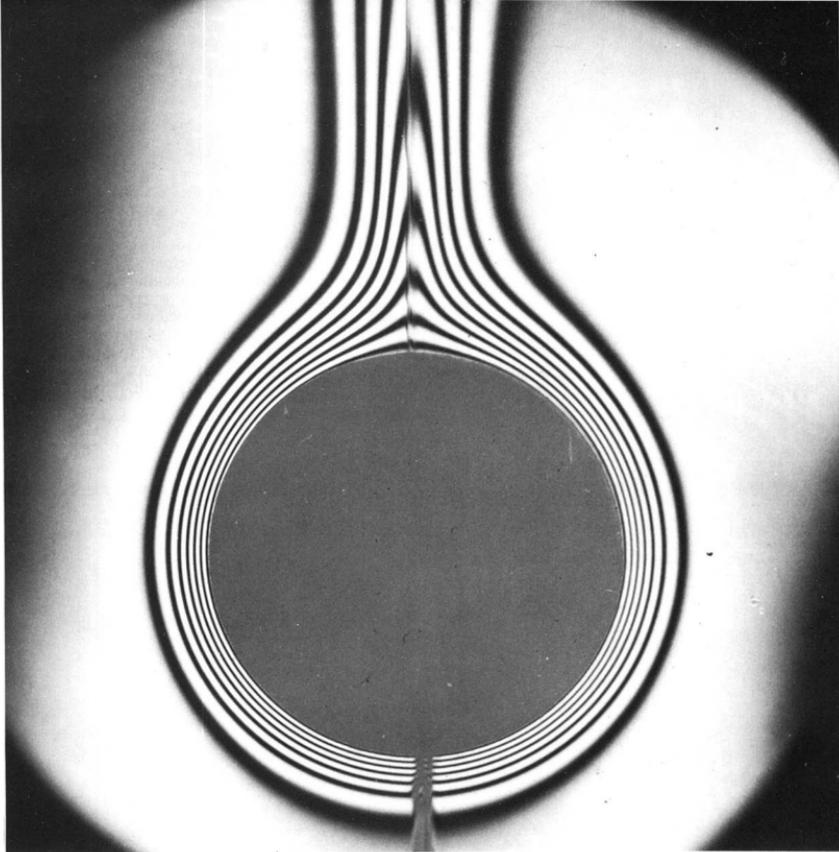




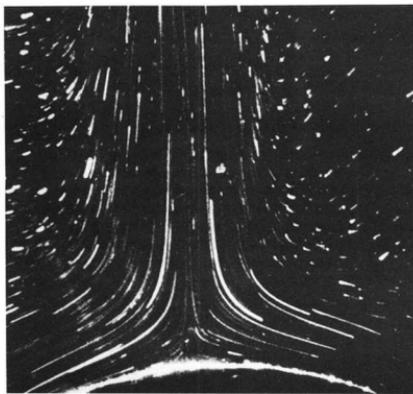
204. Свободная конвекция от вертикальной пластинки. Пластинка была равномерно нагрета в воздухе; это создает установившееся ламинарное течение. Интерферограмма демонстрирует линии постоянной плотности, которые являются также и изотермами, поскольку давление остается почти постоянным. Число Грасгофа равно приблизительно 5 млн. на расстоянии 0,1 м от нижнего края пластинки, так что тепловой пограничный слой оказывается сравнительно толстым. [Eckert, Soehngen, 1948]



205. Свободная конвекция от вертикально расположенной фольги. Туго натянута металлическая фольга подвергается электроннагреву в атмосфере азота при давлении 17 атм. Число Грасгофа возникающего потока равно $5 \cdot 10^{11}$ в верхней части снимка, на расстоянии 19 см от нижнего края. При помощи системы линз тонкий ламинарный тепловой пограничный слой шестикратно увеличен по толщине. При выполняющемся здесь условии равномерного по поверхности теплового потока толщина пограничного слоя растет пропорционально высоте в степени $1/5$. [Gebhart, 1971]



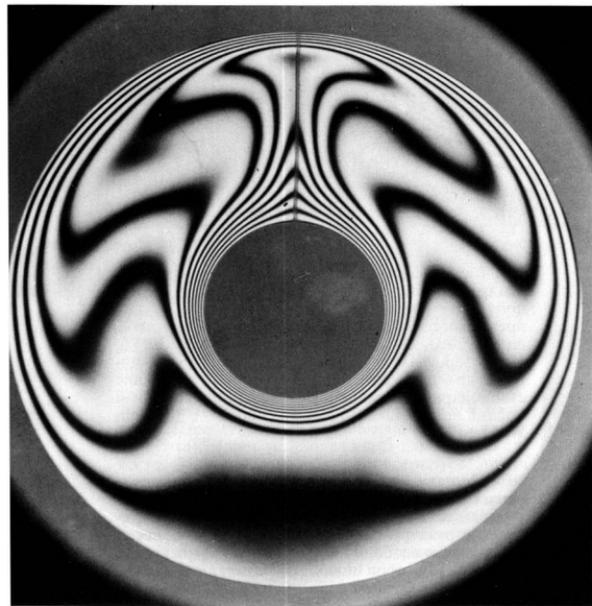
206. Свободная конвекция от горизонтального цилиндра. Круговой цилиндр диаметром 6 см и длиной 60 см равномерно нагрет до температуры, превышающей температуру окружающего воздуха на 9°C , что дает число Грасгофа, равное 30 000. Интерферограмма демонстрирует тепловые пограничные слои, сливающиеся сверху и создающие стационарный ламинарный факел, аналогичный показанному на фото 203. Фото U. Griggull, W. Hauf



207. Пограничные слои, образующиеся при нагревании и сливающиеся в верхней части цилиндра. Частицы пластика, освещаемые в воде, демонстрируют структуру линий тока в условиях, когда ламинарные свободно-конвективные пограничные слои с обеих сторон цилиндра соединяются и образуют факел. Отрыва в потоке, по-видимому, не происходит. [Pera, Gebhart, 1972]



208. Линии тока в конвективном движении между соосными цилиндрами. Дым от сигареты демонстрирует структуру вполне развитого ламинарного течения в воздухе при атмосферном давлении. Диаметр внешнего цилиндра в три раза больше диаметра внутреннего, причем внешний цилиндр холоднее внутреннего на $14,5^{\circ}\text{C}$, что дает число Грасгофа, рассчитанное по ширине зазора, равное 120000. [Grigull, Hauf, 1966]

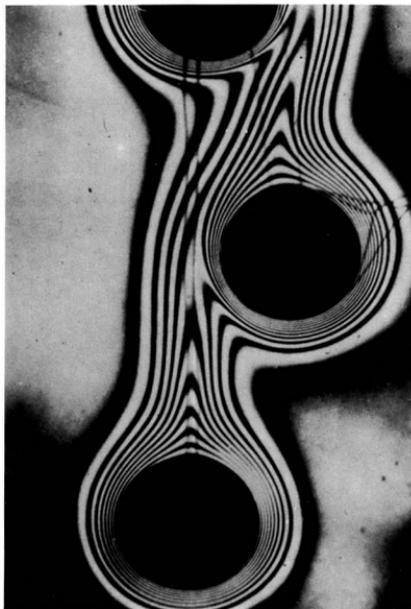


209. Изотермы в конвективном движении между соосными цилиндрами. Интерферограмма демонстрирует распределение температуры почти при тех же условиях, что и на предыдущем снимке: отношение диаметров 3,14, разность температур 13°C , число Грасгофа 122000. На обоих снимках видна область почти неподвижной жидкости под внутренним цилиндром. [Grigull, Hauf, 1966]

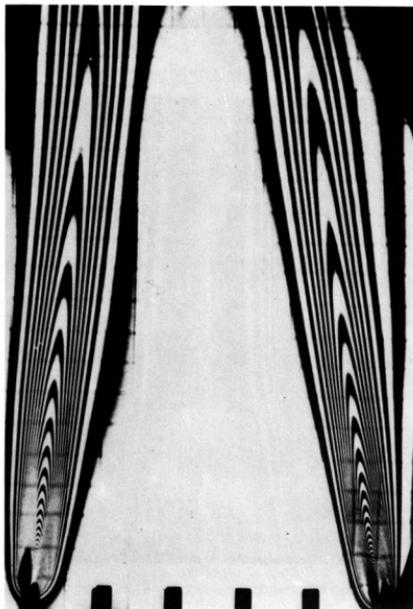


210. Тепловой пограничный слой под горизонтальной пластинкой. Лазерная голографическая интерферограмма дает картину изотерм в воздухе, осредненную по глубине 30 см, под левой половиной нагретой прямоугольной алюминиевой пластинки шириной 10 см и толщиной 1 см. Край пластинки

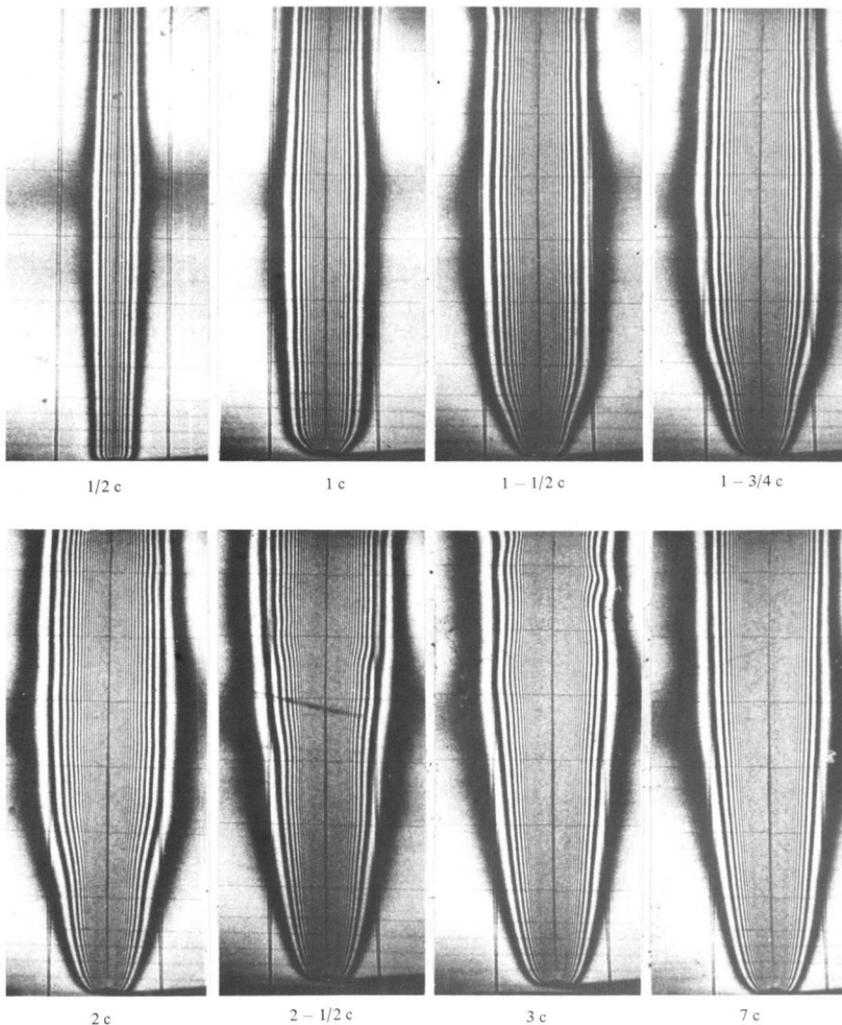
располагается непосредственно над конфигурацией маленьких concentрических дифракционных колец, расположенной внизу слева и образованной частичкой пыли. Число Грасгофа, рассчитанное по ширине, равно 3,3 млн., а разность температур составляет 2,6°C на полосу. [Hatfield, Edwards, 1981]



211. Свободная конвекция от трех горизонтальных цилиндров. Интерферограмма демонстрирует ламинарные конвективные факелы в воздухе, отходящие от каждого из двух нагретых цилиндров и обволакивающие тепловой пограничный слой третьего цилиндра, расположенного выше. [Eckert, Soehngen, 1948]

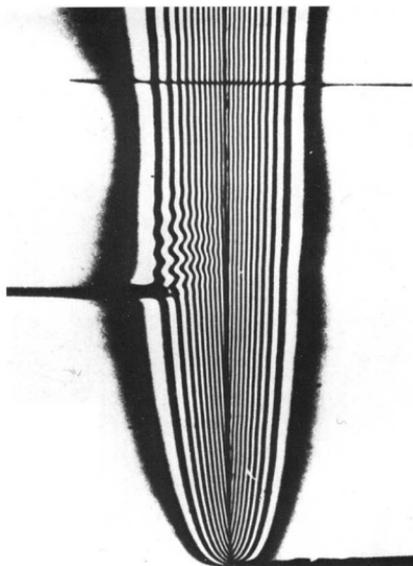


212. Взаимодействие двух одинаковых ламинарных факелов. Нагретые электрическим током никромовые провода длиной 18 см, отстоящие на 7,2 см, образуют конвективные факелы наподобие показанного на фото 203, сливающиеся между собой из-за вовлечения воздуха в промежуточной области. [Pera, Gebhart, 1975]

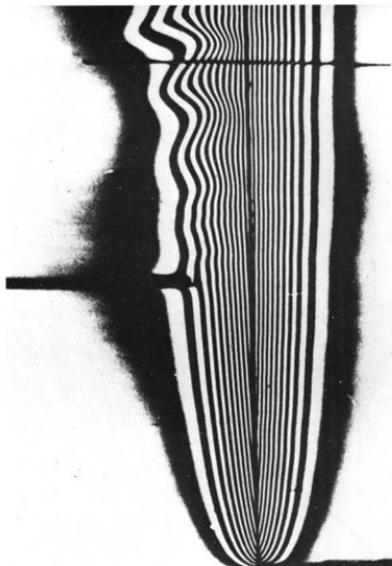


213. Конвекция от внезапно нагретой вертикально расположенной фольги. Фольга толщиной 0,013 мм в воздухе при давлении 18 атм внезапно нагревается электрическим током. Как видно, влияние передней кромки распространяется вверх до тех пор, пока не установится стационарное ламинар-

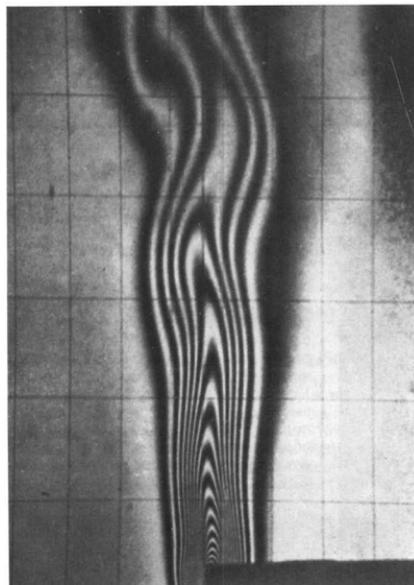
ное течение, показанное на фото 205. Расстояние по вертикали между проволочками координатной сетки составляет 2,5 см. Поле интерференционных полос растянуто оптическим путем в горизонтальном направлении в шесть раз. [Gebhart, Dring, 1967]



214. Неустойчивость конвекции от вертикальной пластинки. Колеблющаяся лента помещена в ламинарный свободно-конвективный пограничный слой на нагреваемой электрическим током фольге в атмосфере азота при давлении 16 атм. Интерферограммы, растянутые по ширине в шесть раз, де-

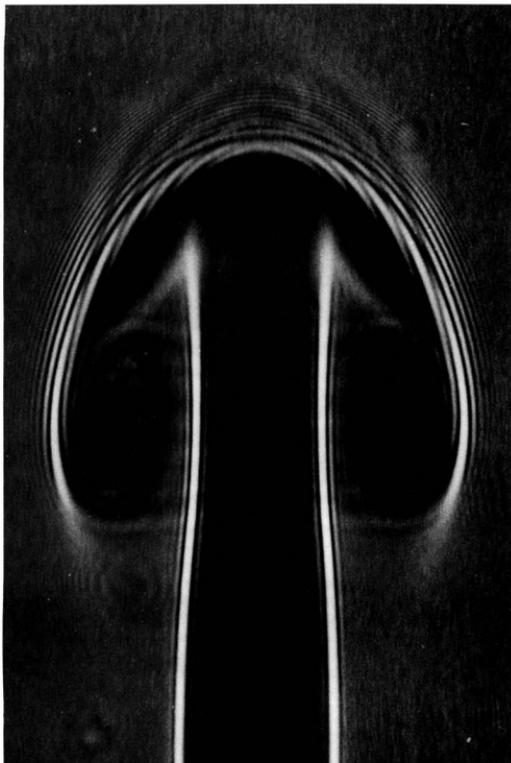
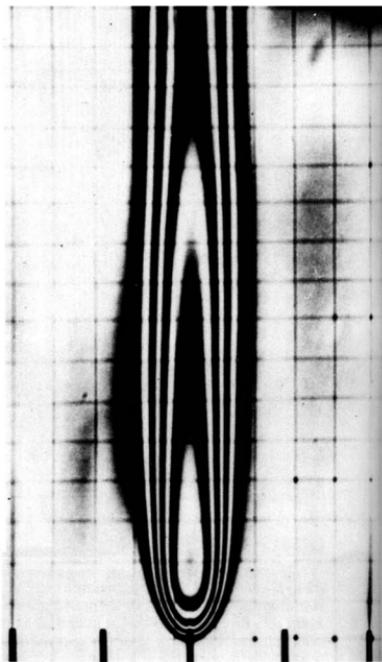


монстрируют возмущения, затухающие на левом снимке при частоте 11,5 Гц и усиливающиеся на правом снимке при частоте 3 Гц в согласии с линейной теорией устойчивости. [Polymeropoulos, Gebhart, 1967]

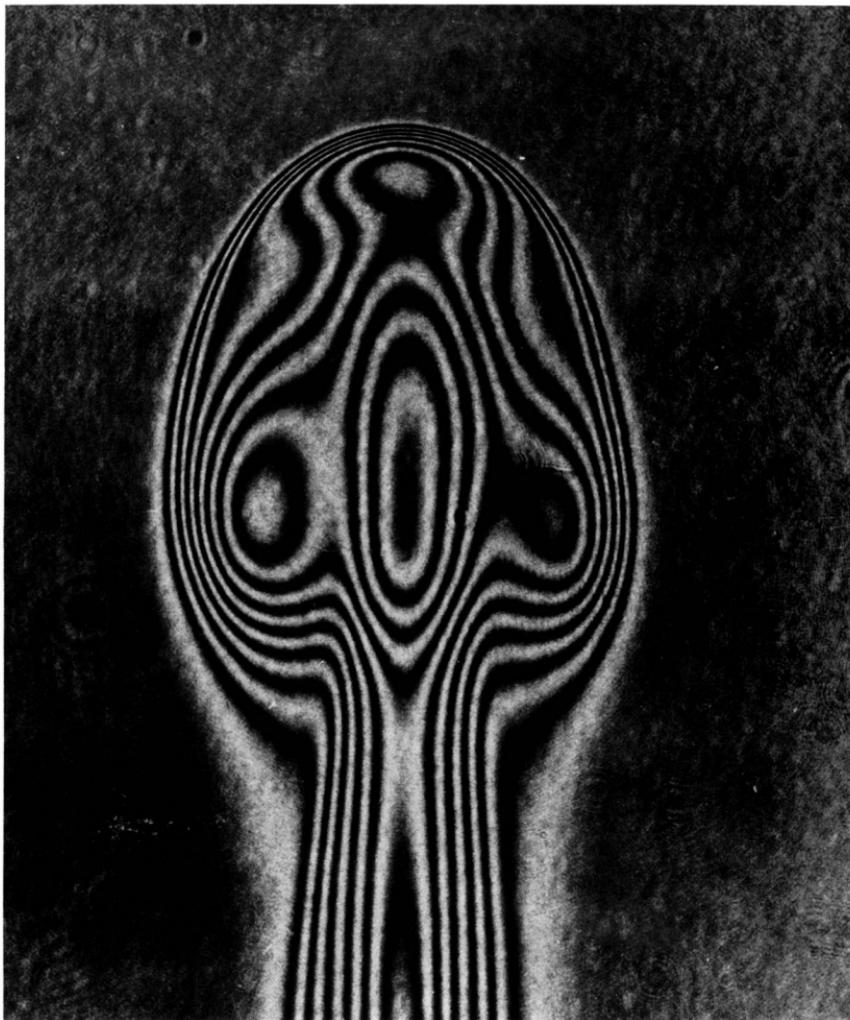


215. Неустойчивость плоского конвективного факела. Ламинарный факел поднимается в атмосферном воздухе от тонкой проволоочки, протянутой горизонтально на расстояние 6 дюймов в направлении нормали к плоскости снимка и нагретой электрическим током. Интерферограмма показывает разности температур 4°C на полюсу. Координатная сетка на заднем плане состоит из прямоугольников размером $1/4$ на $1/2$ дюйма. Металлическая лента, протянутая на длину проволоочки, колеблется над ней в срединной плоскости снимка с частотой 3,6 Гц. Как видно, возмущения нарастают по мере того, как конвекция сносит их вверх. [Pera, Gebhart, 1971]

216. Стационарный осесимметричный факел. Интерферограмма демонстрирует стационарный ламинарный конвективный факел в атмосферном воздухе от сосредоточенного теплового источника: диффузионного пламени диаметром 0,5 мм. [Pera, Gebhart, 1975]



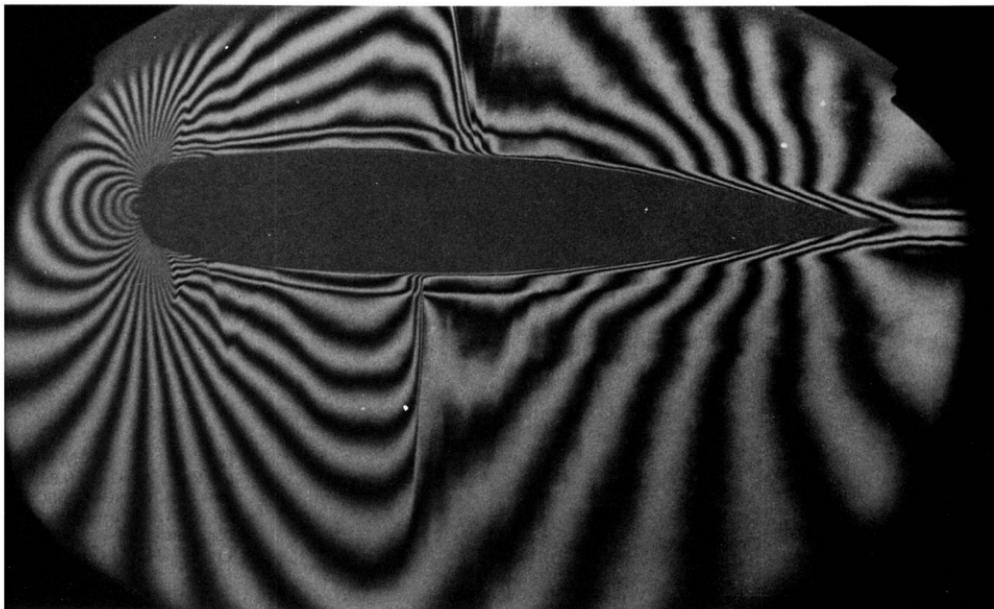
217. Осесимметричный факел на начальной стадии развития. Теневая фотография демонстрирует головку ламинарного факела, поднимающегося от электрода, который внезапно начинает выделять тепло со скоростью 1 кал/с в концентрированный раствор соды. Головка поднимается с постоянной скоростью 1,2 см/с и растет по закону геометрического подобия, так что ее ширина, равная 1 см, составляет одну пятую долю ее высоты. Осесимметричная колонна под головкой похожа на такую же область в установившемся факеле, показанном на предыдущем снимке. [Shlien, Boxman, 1981]



218. Головка осесимметричного факела на начальной стадии его развития. Ламинарная головка имеет ширину 1 см после того, как она поднялась на высоту 7 см от маленького электрода на дне сосуда, содержащего 0,1%-ный раствор поваренной соли в воде. Спиральная структура вихревых колец, показанная на предыдущем снимке для случая концентрированного раствора с числом Прандтля,

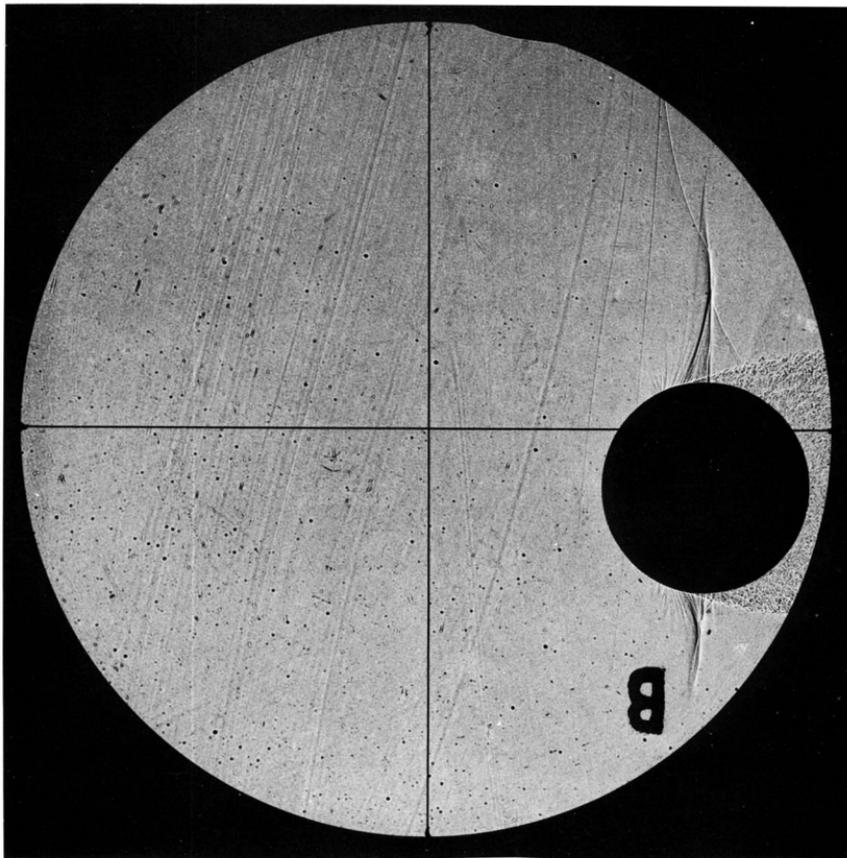
равным 21, здесь, при числе Прандтля, равном 7, отсутствует. Интерференционные полосы не являются здесь изотермами, так как поток осесимметричен, однако они обнаруживают максимумы температуры на оси вблизи вершины головки, а также вне оси в средней части головки. [Shlien, Voxman, 1981]

9. Дозвуковое течение



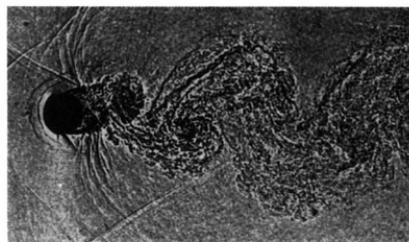
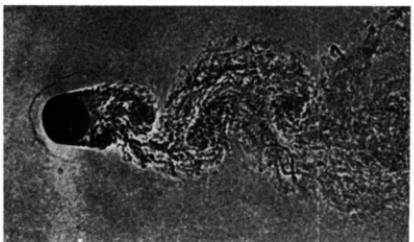
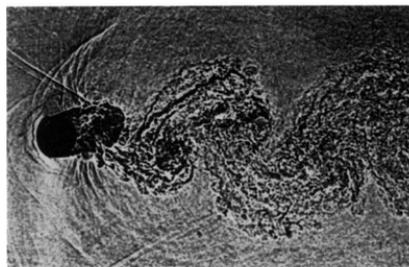
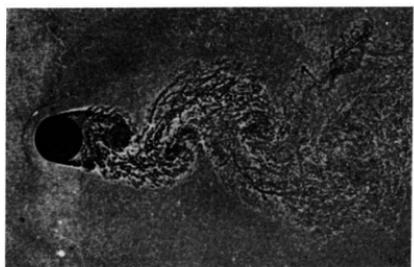
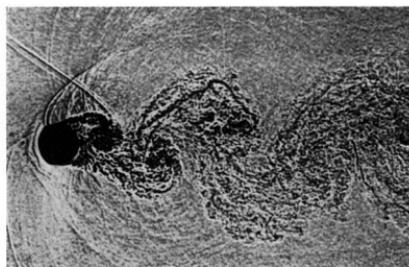
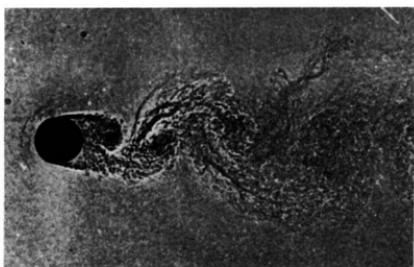
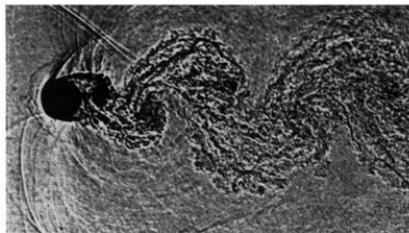
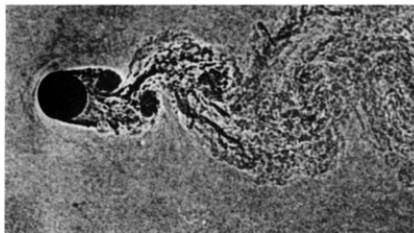
219. Симметричный профиль при $M = 0,8$. Транзвуковой воздушный поток, обтекающий профиль с хордой 12,7 см и с относительной толщиной 16,3%, сфотографирован в канале шириной 10 см. Линии постоянной плотности на интерферограмме демонстрируют структуру течения, почти симметричную сверху и снизу, с ударными волнами,

стоящими вблизи середины хорды, и присоединенным пограничным слоем, утолщающимся по направлению к задней кромке. Очень маленькая область ламинарного отрыва у плеча профиля вызывает искажение веера расширения. [Hiller, Meier, 1971]



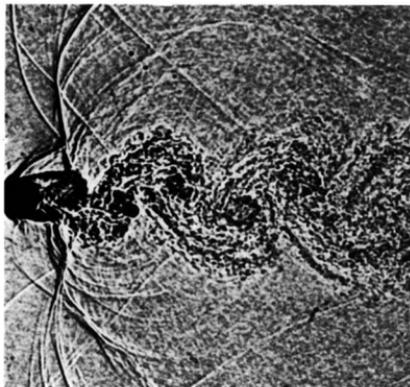
220. Шар при $M = 0,86$. Шар в свободном полете в воздухе при числе Рейнольдса 920 000 был схвачен вспышкой при теновом фотографировании почти за пределами поля зрения. Видно, что ударная волна вызывает турбулентный отрыв перед

экватором в противоположность случаю малого числа Маха, показанному на фото 58. Фото A. Stilp, Ph. D. Thesis, Институт им. Эрнста Маха, Фрайбург, 1965, любезно предоставлено Н.-О. Amann

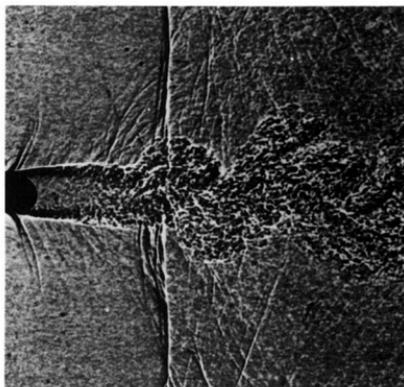


221. Вихревая дорожка за цилиндром. Каждая из двух серий искровых теневых фотографий, сделанных со скоростью 30 000 кадров в секунду, охватывает одну треть периода схождения вихрей с поверхности кругового цилиндра. Слева показано чисто дозвуковое течение при числе Маха невозму-

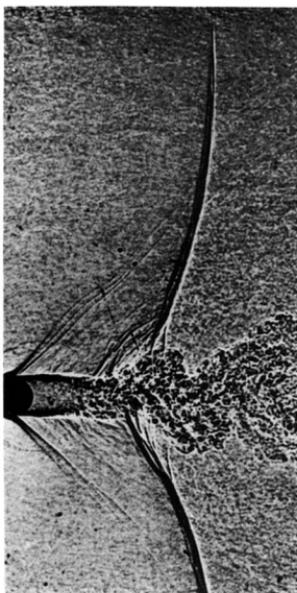
щенного потока, равном 0,45, и числе Рейнольдса 110 000; справа – перемежающееся сверхкритическое течение при $M = 0,64$ и $Re = 1,35$ млн. Неполное искажение цилиндра обусловлено параллаксом. [Dyment, Gryson, Ducruet, 1980]



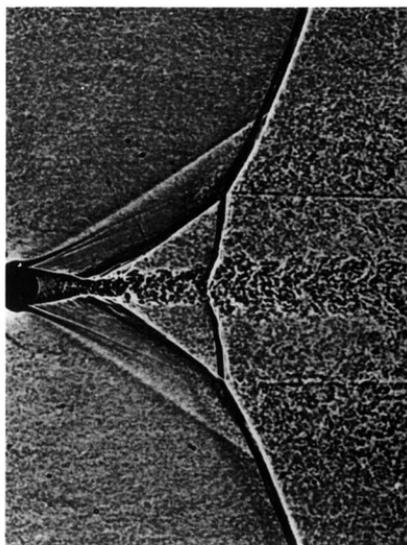
$M = 0,80$



$M = 0,90$



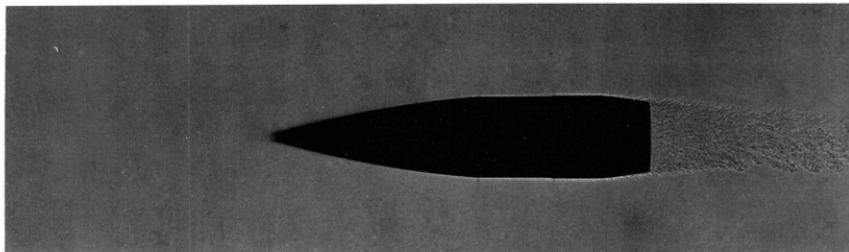
$M = 0,95$



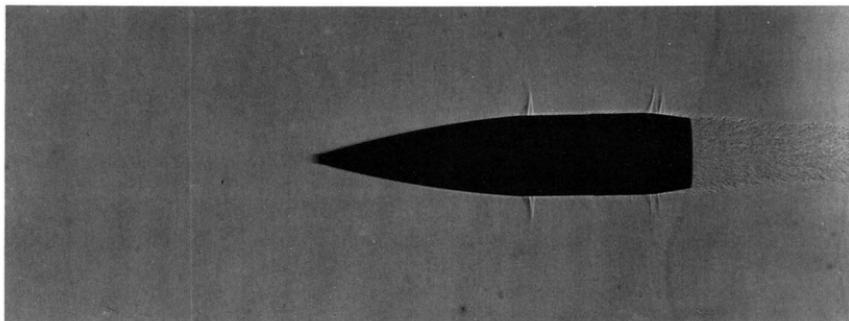
$M = 0,98$

222. Развитие следа при возрастающем числе M . По мере того как число Маха невозмущенного потока возрастает, приближаясь к единице, след за круговым цилиндром переходит от периодическо-

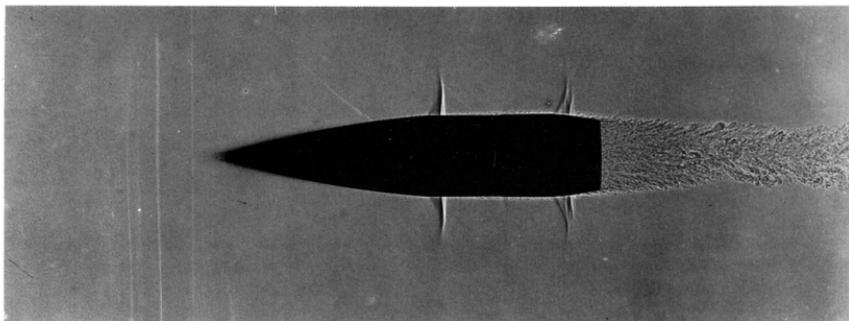
го схождения вихрей, характерного для малых скоростей, к квазистационарному следу с шейкой, устанавливающемуся при сверхзвуковых скоростях. [Dumont, Gryson, Ducruet, 1980]



$M = 0,840$



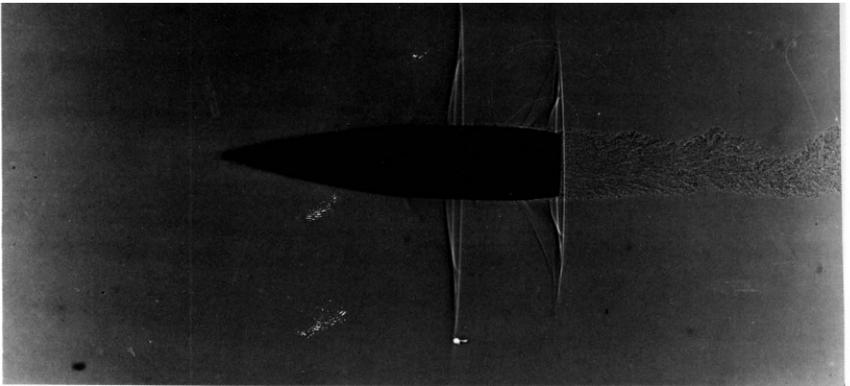
$M = 0,885$



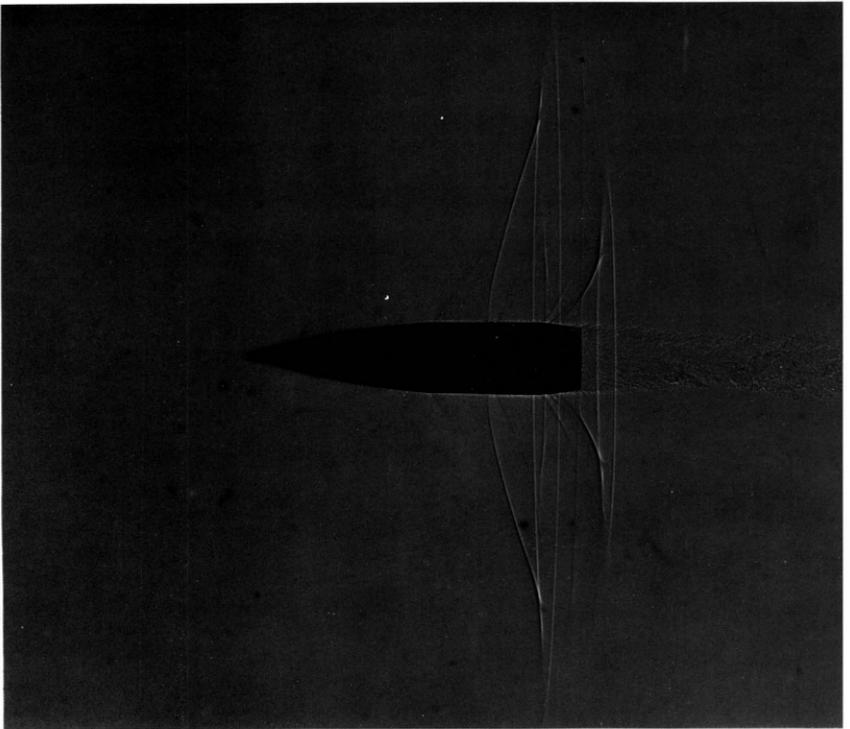
$M = 0,900$

223. Снаряд при больших дозвуковых скоростях. Теневые искровые фотографии, приводимые на этих двух страницах, расположены так, чтобы показать развитие картины ударных волн, входящих по мере увеличения числа Маха все глубже в дозвуковое поле обтекания модели артиллерийского снаряда. Снаряд находится в свободном полете

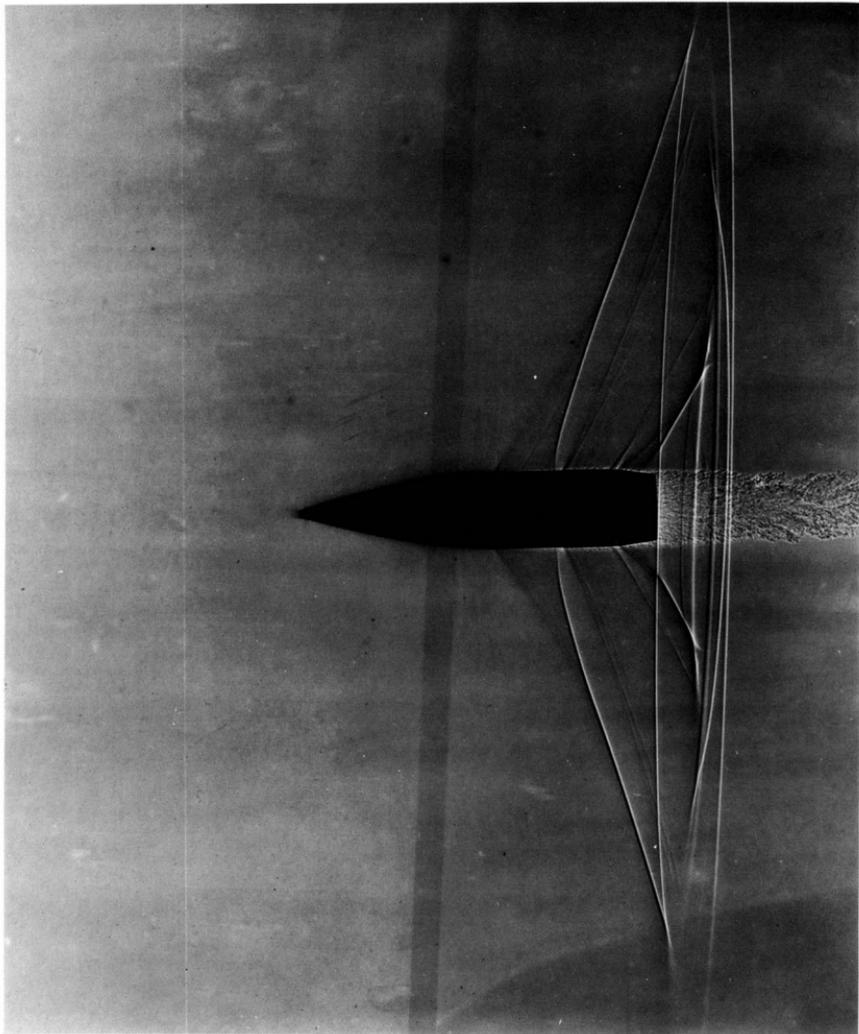
сквозь атмосферу при угле атаки, меньшем $1,5^\circ$. Эти пять фотоснимков соответствуют четырем различным выстрелам, причем во время каждого из них число Маха постепенно уменьшается с замедлением движения снаряда. Фото А. С. Charters [von Kármán, 1947]



$M = 0,946$



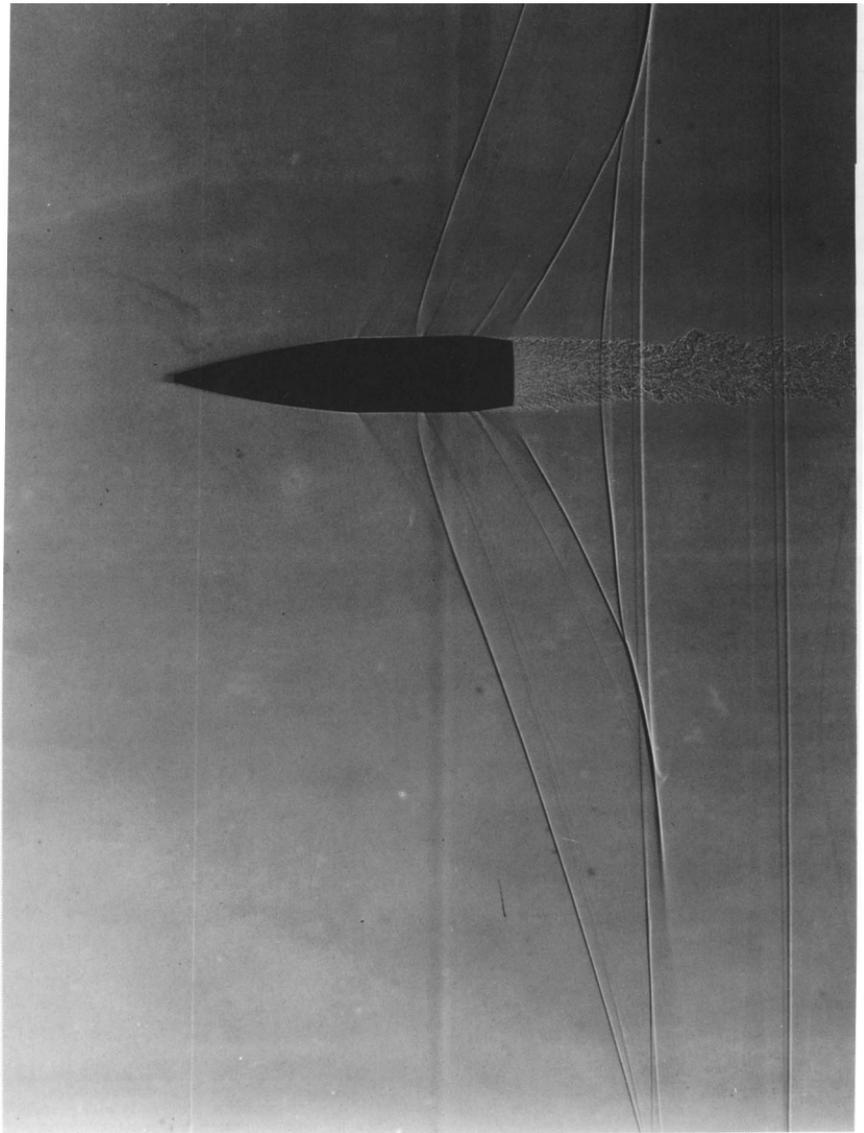
$M = 0,971$



$M = 0,978$

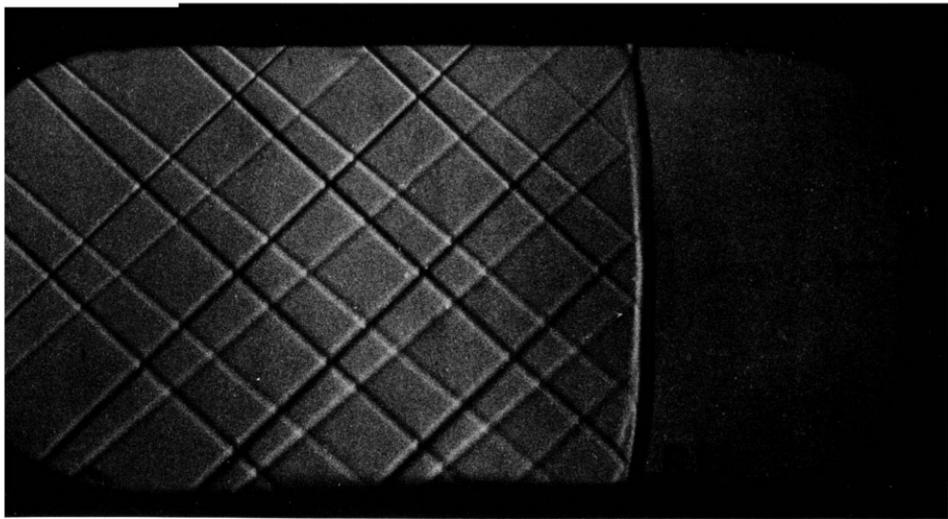
224. Снаряд при околосвуковой скорости. При еще большем приближении к скорости звука картина ударных волн, показанная на предыдущих страницах, растягивается в поперечном направлении на большие расстояния. Два приведенных здесь сним-

ка сделаны во время одного и того же выстрела, причем второй снимок отвечает более раннему положению объекта на траектории. Фото А. С. Charters [von Kármán, 1947]



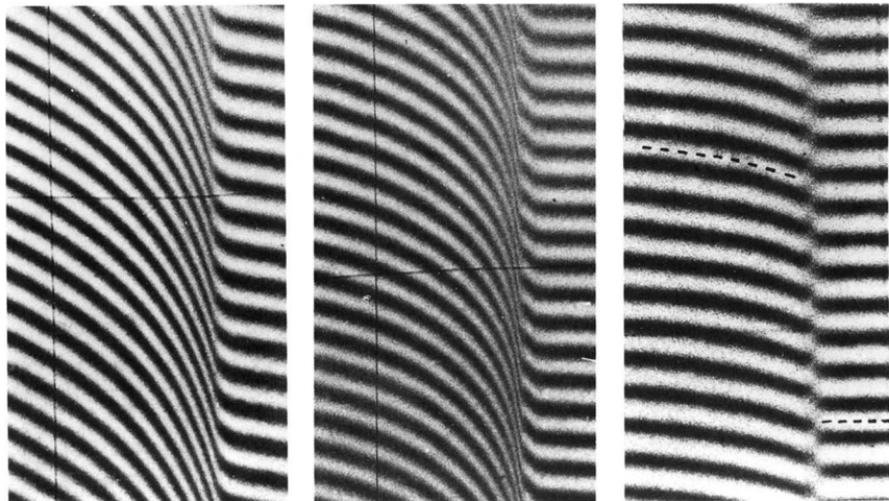
M = 0,990

10. Ударные волны



225. Прямая ударная волна при $M = 1,5$. Картина, состоящая из пар слабых косых ударных волн (N-образные волны фотографий 265 и 269), создается полосками клейкой ленты на нижней и верхней стенках сверхзвукового сопла. Эти волны заканчи-

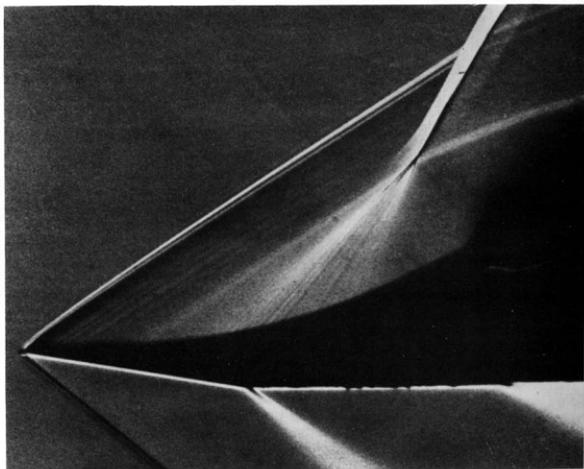
ваются на почти прямой и нормальной потоку ударной волне, причем видно, что вниз по потоку от этой волны течение становится дозвуковым. Фото U. S. Air Force, с любезного разрешения Arnold Engineering Development Center

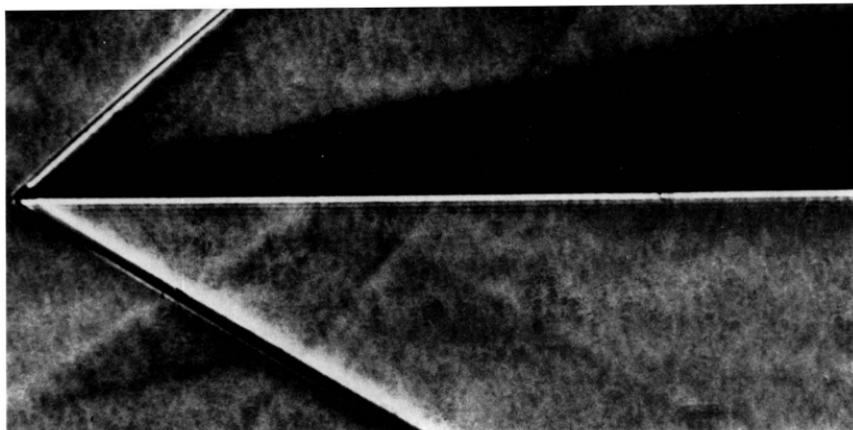


226. Нестационарное формирование прямой ударной волны. Классическое описание усиления крутизны течения непрерывного сжатия до возникновения ударной волны визуализируется здесь с помощью интерферометрии в ударной трубе. Из-за того что взрывное разрушение диафрагмы приводит к возникновению начальной волны неправильной формы, в ударной трубе подвешивается листок из пластика, по которому ударяет первичная волна.

Обладая конечной массой, листок плавно ускоряется, и образуется непрерывная волна. Три снимка, сделанные последовательно на всё больших расстояниях от листка (находящегося слева, вне поля зрения), демонстрируют усиление крутизны профилей плотности. На последнем снимке этот профиль представляется разрывным; штриховая линия нанесена для того, чтобы показать величину сдвига полос. [Griffith, Bleakney, 1954]

227. Стационарное формирование косой ударной волны. Вогнутая цилиндрическая поверхность в сверхзвуковой аэродинамической трубе при числе Маха, равном 1,96, создает сходящийся веер волн сжатия, визуализация которых осуществляется шликрен-методом, причем кромка ножа параллельна невозмущенному потоку. Эти волны фокусируются примерно так же, как центрированная волна сжатия, образуя в результате сильную косую ударную волну, поворачивающую поток на $22,5^\circ$. Обтекаемая поверхность продолжается вверх по потоку в форме плоской пластинки с нулевым углом атаки, так что слабая ударная волна, идущая от слегка затупленной передней кромки, не искажает картины. Поверхность сделана шероховатой для турбулизации пограничного слоя и предотвращения его отрыва. [Johannesen, 1952]





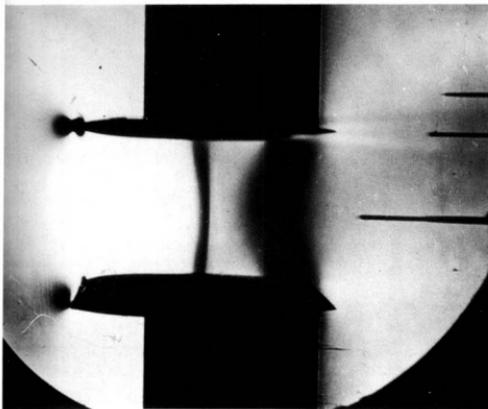
228. Присоединенные косые ударные волны при обтекании клина сверхзвуковым потоком. Поток воздуха в сверхзвуковой аэродинамической трубе при $M = 1,96$ отклоняется заостренным клином с полным углом при вершине в 10° и с нижней гранью, параллельной потоку. Фотография, сделанная

шлирен-методом при горизонтальной кромке ножа, демонстрирует ударные волны с отношением давлений, равным 1,7 вверху и 1,02 внизу. На нижней поверхности виден ламинарный пограничный слой. [Bardsley, Mair, 1951], любезно предоставлено N. Johannesen

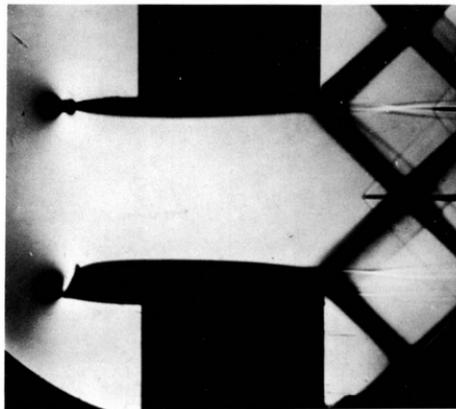


229. Гидравлическая аналогия обтекания клина сверхзвуковым потоком. Однородный слой воды глубиной 5 мм течет со сверхкритической скоростью по горизонтальной плоскости и отклоняется заостренным клином с углом при вершине 10° и с нижней гранью, параллельной потоку. Гравита-

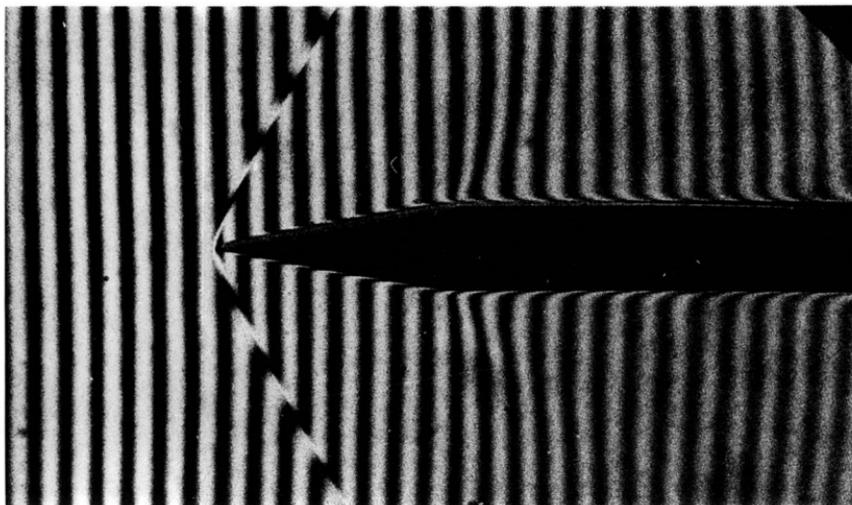
ционные волны моделируют косые волны, показанные на предыдущем снимке, однако общая картина оказывается несколько усложненной из-за капиллярных волн в области вверх по потоку от клина. Фото Е. J. Klein [Merzkirch, 1974]



230. Критическое и сверхкритическое обтекание прямой решетки профилей. В канале между симметричными профилями в аэродинамической трубе происходит запирание. На снимке слева слабая нормальная ударная волна возвращает поток практически к тому же числу Маха, равному 0,65 и соответствующему дозвуковому запиранию, которое имеет место перед решеткой. На снимке спра-

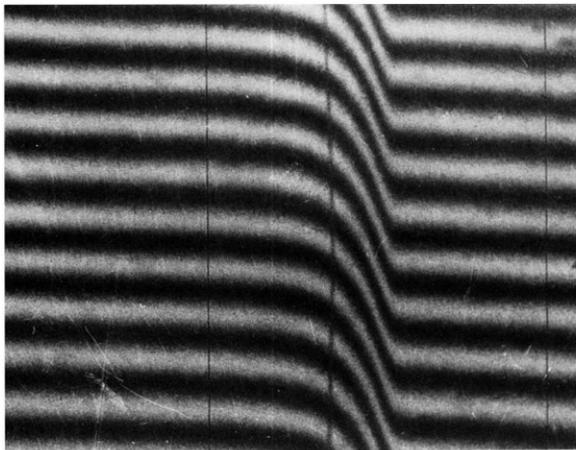


ва течение за звуковой горловиной сопла становится сверхзвуковым и достигает за решеткой максимального числа Маха, равного 1,4, о чем свидетельствуют маховские бриллиантообразные структуры, образующиеся за задними кромками. При визуализации шлирен-методом кромка ножа горизонтальна. [Ackeret, Rott, 1949]

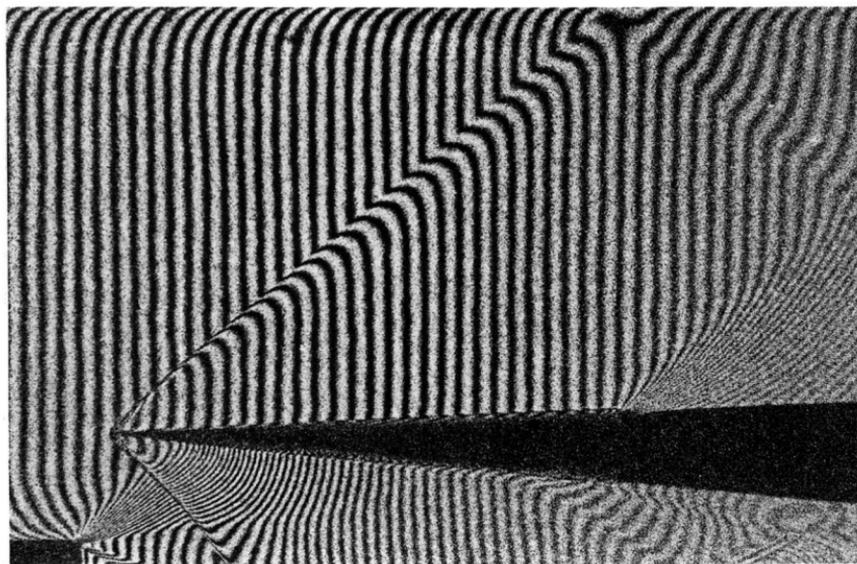


231. Симметричные ударные волны при обтекании клина. Ударная труба используется здесь как нестационарная аэродинамическая труба. Интерферограмма демонстрирует картину обтекания воздухом при $M = 1,45$ комбинации клин-пластинка

с полууглом раствора клина 10° . Стационарное течение устанавливается спустя 100 мкс после того, как набегающая ударная волна проходит через вершину клина. [Bleakney, Weimer, Fletcher, 1949]

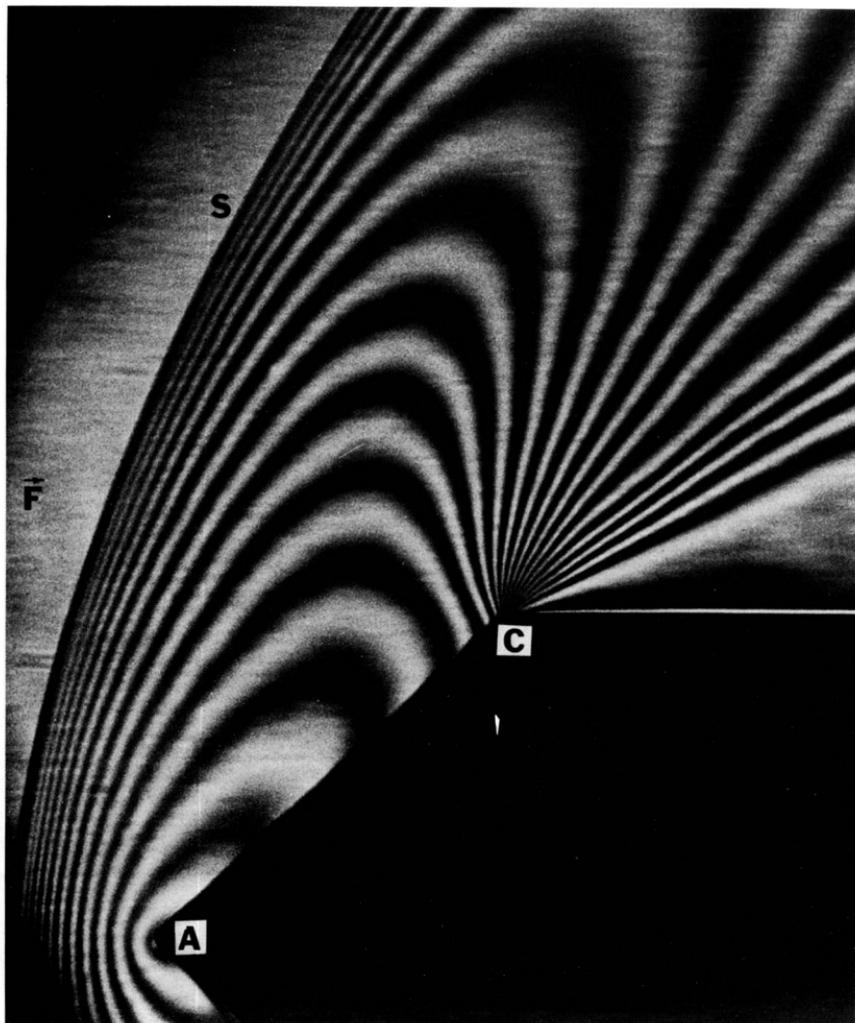


232. Непрерывная структура ударной волны в углекислом газе. Приводимая интерферограмма демонстрирует слабую плоскую ударную волну, распространяющуюся вправо в углекислом газе, при течении в ударной трубе с числом Маха, примерно равным 1,04. Непрерывные интерференционные полосы выявляют вполне размазанную структуру, возникновение которой обусловлено относительно медленной релаксацией колебательной энергии молекул. Толщина ударной волны составляет примерно 8 мм. Фото Walker Bleakney



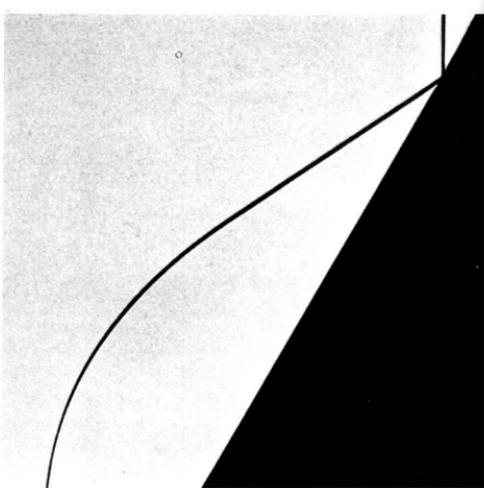
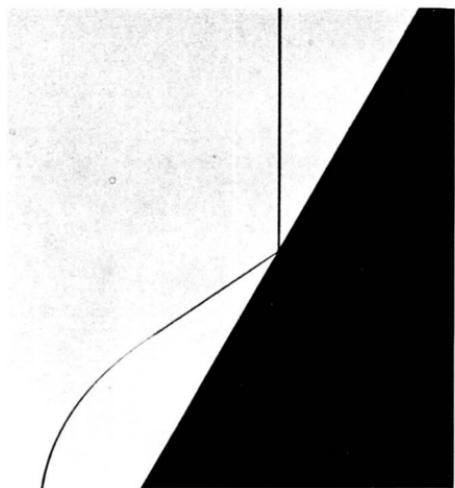
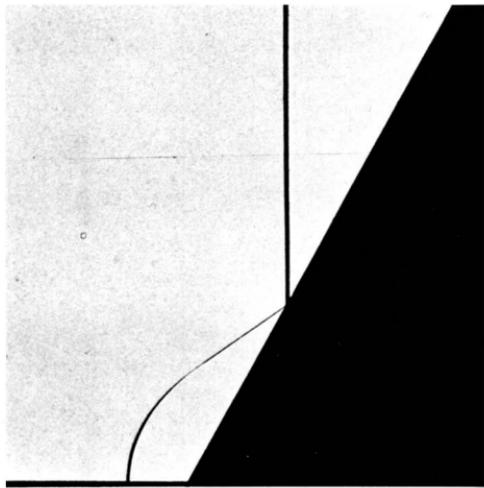
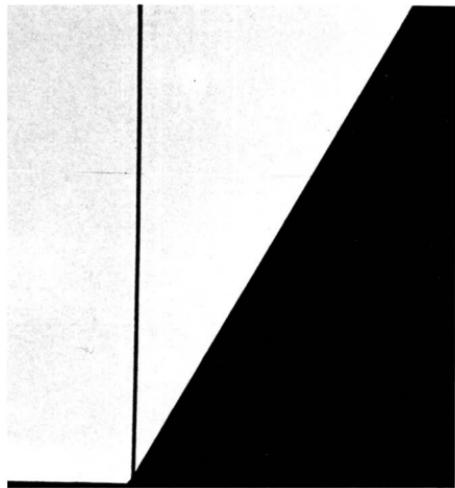
233. Релаксационное расширение фронта ударной волны при обтекании клина. Интерферограмма демонстрирует установившееся течение окиси азота в ударной трубе при числе Маха 1,67. Верхняя грань клина наклонена под углом 2° к направле-

нию потока. Ударная волна уширяется по мере того, как колебательная энергия, замороженная на кромке, релаксирует, создавая вполне размазанную структуру. [Hornby, Johannesen, 1975]



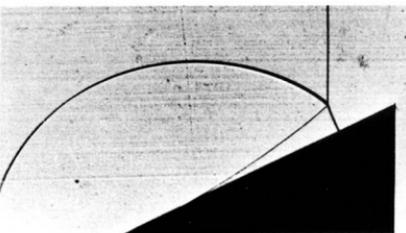
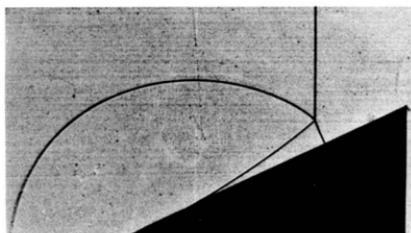
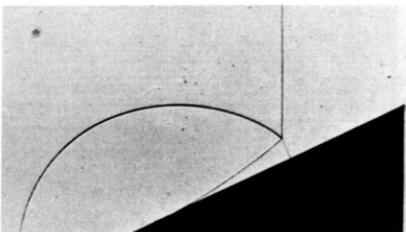
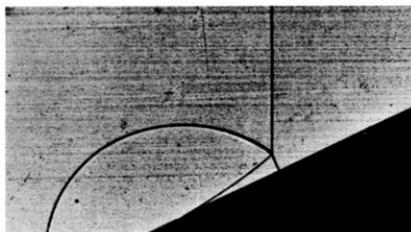
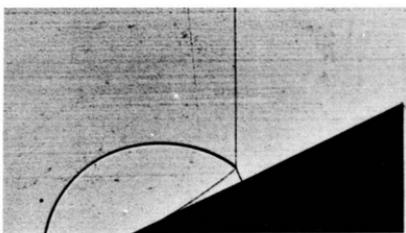
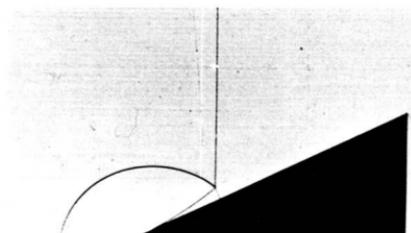
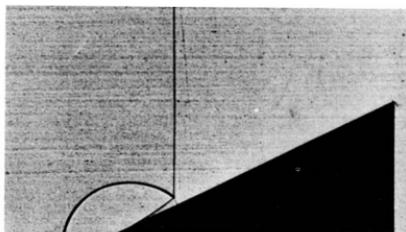
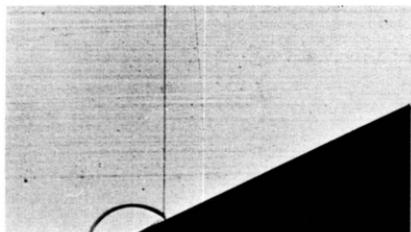
234. Отошедшая головная ударная волна при обтекании толстого клина. Интерферограмма в полосах бесконечной ширины показывает линии постоянной плотности при обтекании клина А с полууглом раствора клина 45° воздушным потоком \vec{F} при числе Маха 2,5. Присоединенной ударной волны, которая могла бы нужным образом повернуть по-

ток, не существует, и поэтому ударная волна S отходит от клина и создает зону дозвукового течения, простирающуюся до угловой точки С. Здесь веер расширения Прандтля-Майера поворачивает поток, сопрягая его со сверхзвуковой зоной за угловой точкой. [Glass, 1974]



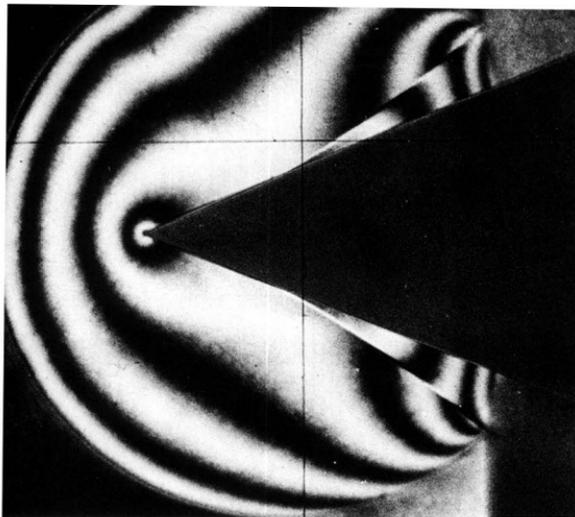
235. Регулярное отражение ударной волны от клина. Теневые фотографии показывают плоскую вертикальную ударную волну, идущую слева и набегающую на клин с полууглом раствора 60° . Угол раствора клина и интенсивность ударной волны таковы, что отражение является регулярным. Углы наклона падающей и отраженной ударных волн к грани клина не равны между собой, так как

явление в целом нелинейно. Поскольку влиянием вязкости можно пренебречь, характерной длины не существует и течение оказывается автомодельным: видно, что вся волновая картина линейно расширяется со временем, начиная с момента контакта волны с передней кромкой. [Schardin, 1965], любезно предоставлено Н. Oertel, Sr.

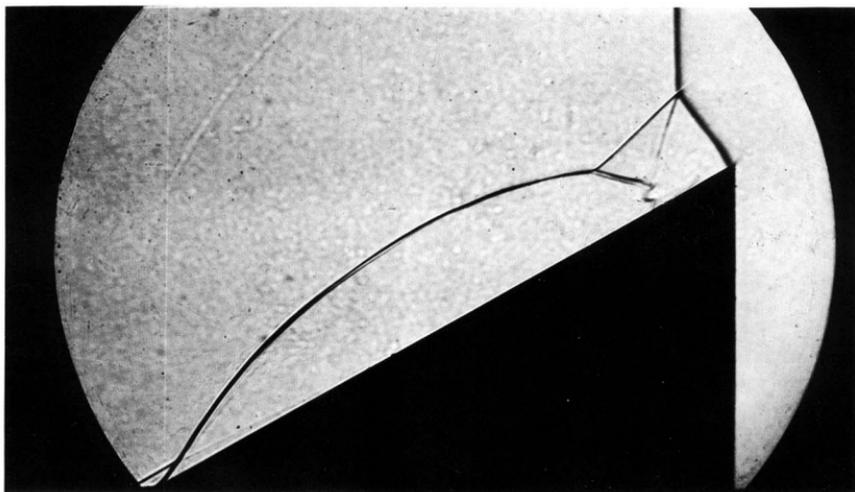


236. Маховское отражение ударной волны от клина. Теневые фотографии показывают плоскую вертикальную ударную волну, набегающую на клин с полууглом раствора 25° . Регулярное отражение, показанное на предыдущей серии снимков, при меньших углах раствора клина заменяется показанной здесь картиной маховского отражения. Третья ударная волна — маховская ножка — идет нормально к поверхности и в тройной точке пере-

секается с падающей и отраженной ударными волнами. Кривая, идущая от этой точки вниз налево и плавно выходящая на поверхность, представляет собой линию скольжения, на которой энтропия претерпевает разрыв, так как по различным сторонам от этой линии воздух испытывает воздействие различных ударных волн. Время между двумя последовательными снимками равно $6 \cdot 10^{-5}$ с. [Scharadin, 1965], любезно предоставлено Н. Oertel, Sr.

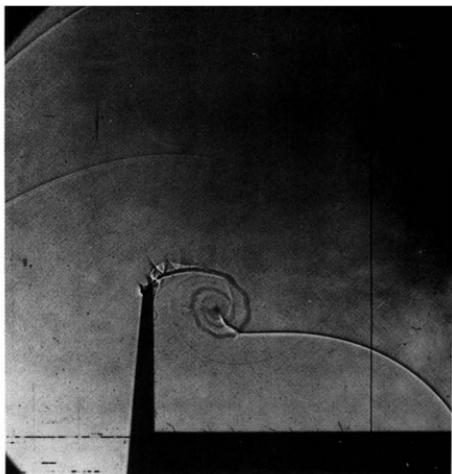
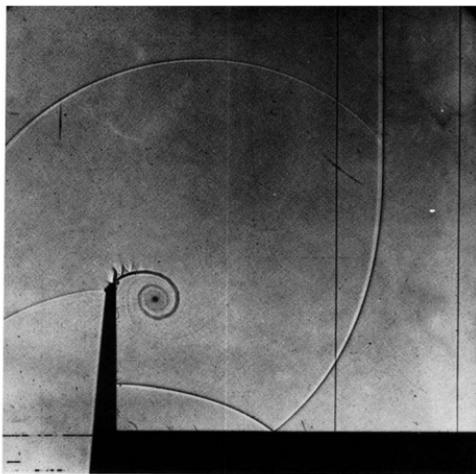


237. Обыкновенное маховское отражение от клина. На интерферограмме в полосах бесконечной ширины видны линии постоянной плотности за плоской ударной волной, набегающей симметрично на клин с полууглом раствора $22,5^\circ$. Ясно видны разрывы плотности при переходе через каждую из линий скольжения. [Griffith, Bleakney, 1954]



238. Нерегулярное маховское отражение от клина. Как показывает теневая фотография, если падающая ударная волна достаточно сильна (в данном случае она движется со скоростью 2400 м/с), обыкновенное маховское отражение заменяется так называемым нерегулярным маховским отражением. Здесь маховская ножка первоначального маховского отражения только что дошла до основания клина. Однако характерная особенность новой

картины состоит в том, что отраженная ударная волна над клином состоит из прямолинейной и криволинейной частей, причем от точки их соединения отходит еще одна ударная волна, перпендикулярная линии скольжения, идущей от первоначальной тройной точки. Вблизи поверхности клина линия скольжения закручивается под воздействием пограничного слоя. [Prasse, 1971], любезно предоставлено Н.-О. Amann



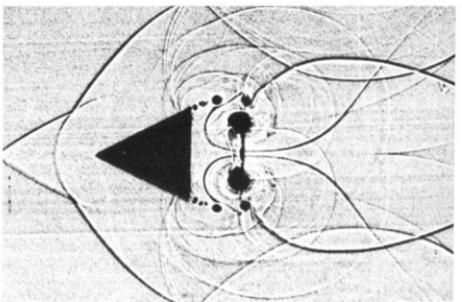
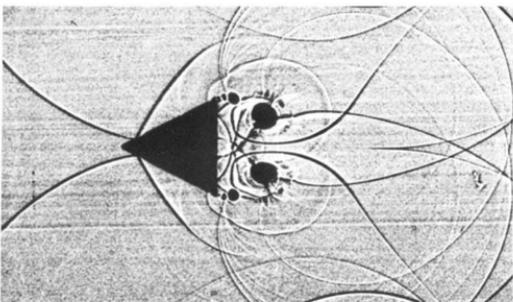
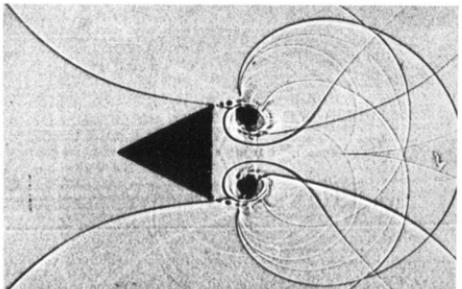
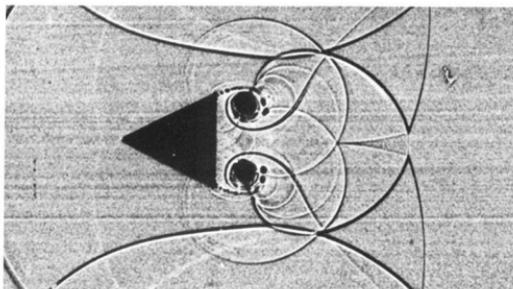
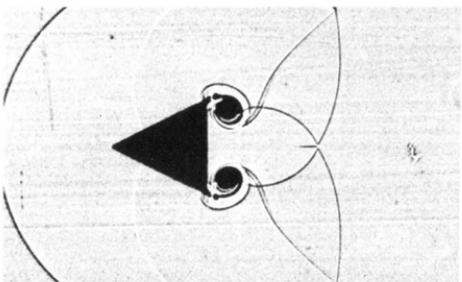
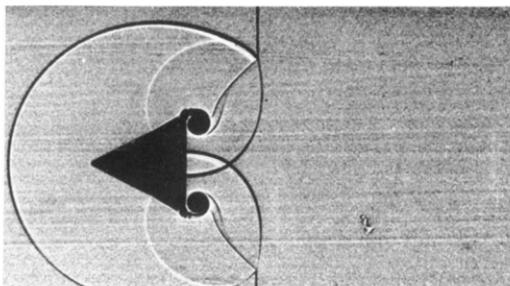
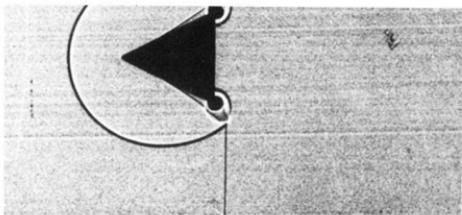
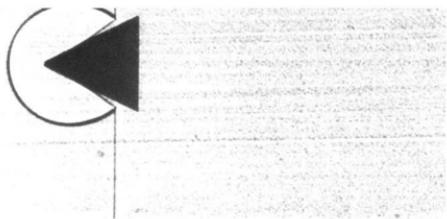
239. Дифракция ударной волны на кромке. На этих двух последовательных тневых фотографиях видно, как в ударной трубе зарождаются вихри, показанные на фото 82 и 83. Относительно слабая плоская ударная волна проходит над вертикально расположенной кромкой, порождая линию скольжения, сворачивающуюся в спираль. На линии скольжения возникает серия лямбдообразных ударных волн. На втором снимке отраженная ударная волна пересекается вихревой пеленой, ко-

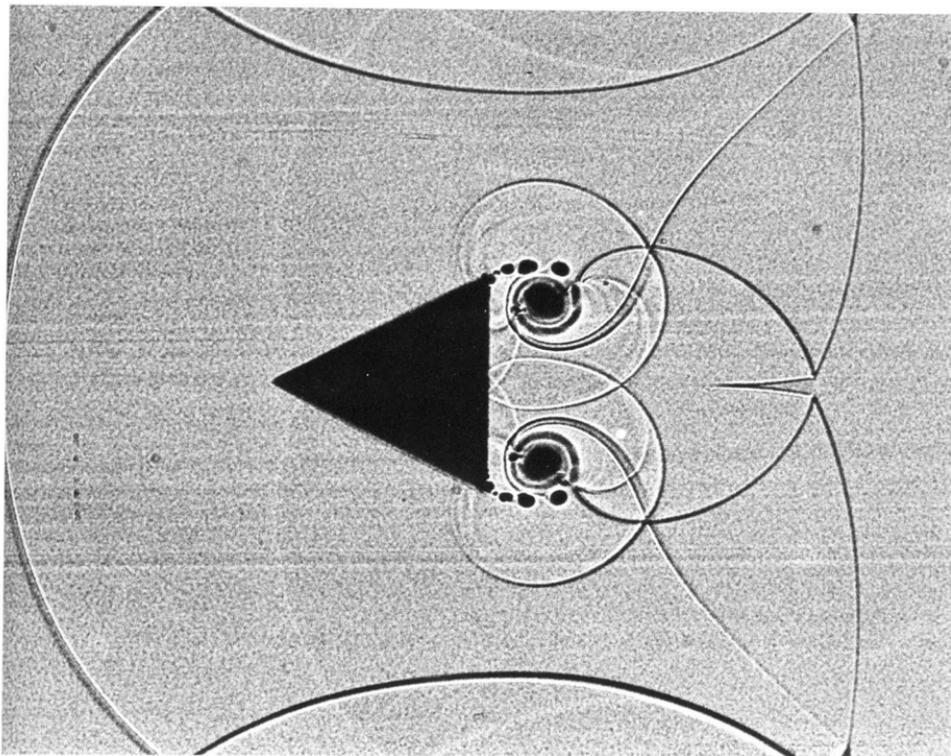
торая создает на волне изломы, причем неустойчивость течения в пелене становится очевидной. Можно проследить также слабую ударную волну, идущую от лямбдообразных скачков через вихрь до пересечения под прямым углом с основной отраженной волной. Эта волна представляет собой часть отраженной ударной волны, несенную левой частью вихря. Фото Russell E. Duff, Otto Laporte's Laboratory at the University of Michigan, 1948–1949 гг.



240. Дифракция ударной волны внутри прямоугольного ящика. Ударная волна в азоте дифрагирует при прохождении через окно на одном конце прямоугольного ящика и отражается от другого его конца. На тневой фотографии видна замечательная картина ударных волн, линий скольжения и вихрей, причем картина вполне определенная и воспроизводимая. Три следа, видные справа и напоминающие витые веревки, представляют собой

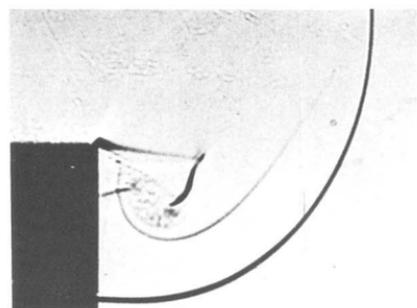
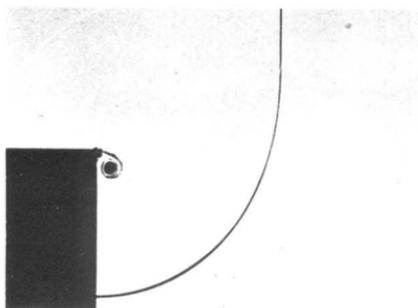
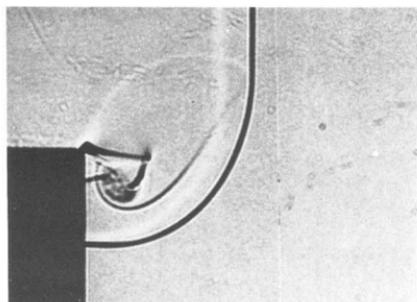
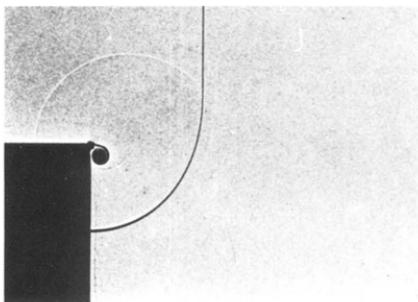
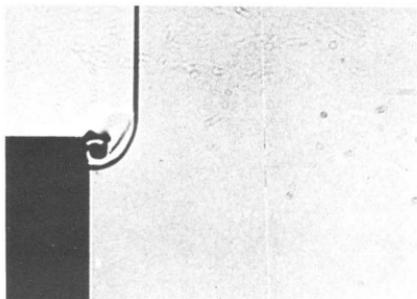
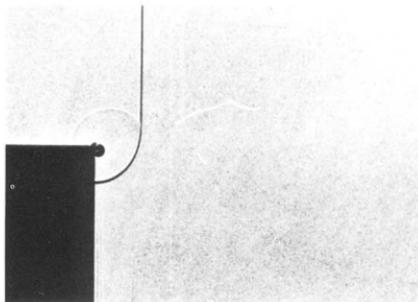
линии скольжения, возникшие, когда дифрагированная ударная волна колебалась по форме, проходя через ящик. Эти линии скольжения подверглись возмущениям под действием ударных волн, проходящих через них под углами, близкими к прямому. Ясно видны также несколько элементов отрывного погранслоного течения. Фото Russell E. Duff, Laporte's Laboratory





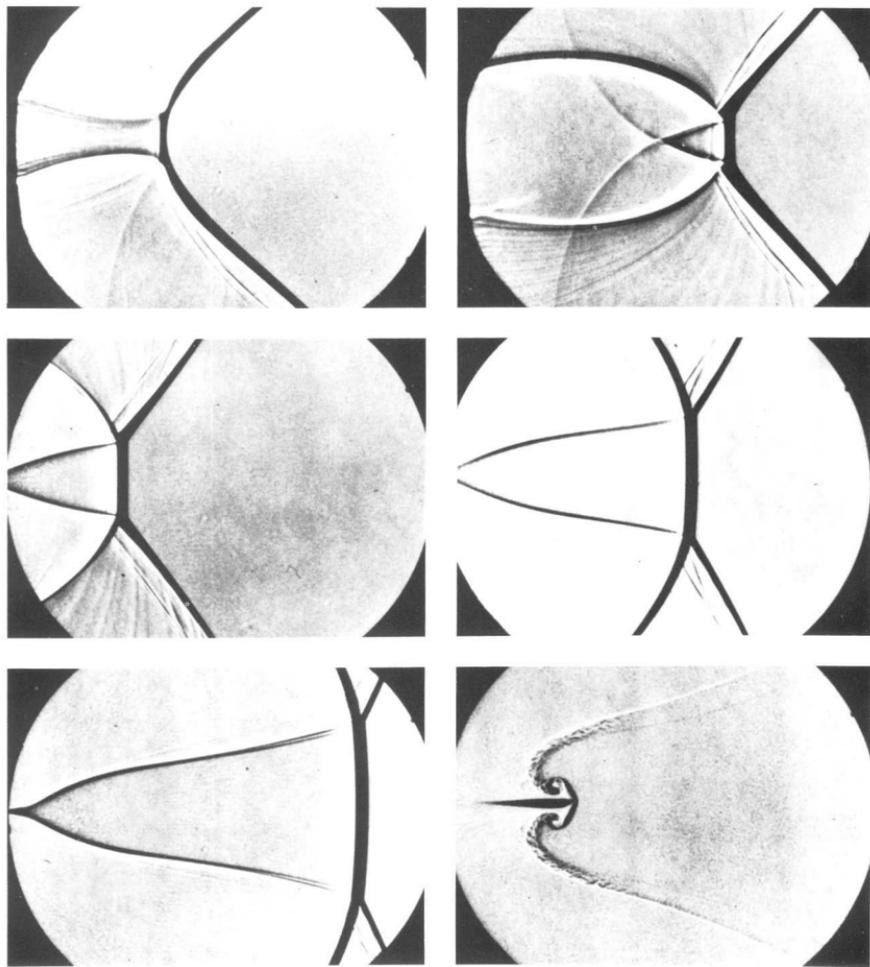
241. Дифракция ударной волны на конечном клине. Первая из приводимой здесь серии последовательных теневых фотографий демонстрирует обыкновенное маховское отражение плоской ударной волны, как на фото 236 и 237. После того как ударная волна проходит через основание клина, происходит отрыв потока и зарождаются вихревые слои, которые сворачиваются так, как показано на фото 81. Дальнейшее взаимодействие кли-

на с ударной волной приводит к возникновению все усложняющейся картины из ударных волн, линий скольжения и вихрей. Последний кадр, сделанный с большим увеличением, демонстрирует замечательную по сложности картину симметричного обтекания, соответствующую моменту между четвертым и пятым снимками основной серии фотографий. Фото Н. Schardin [Oertel, 1966]



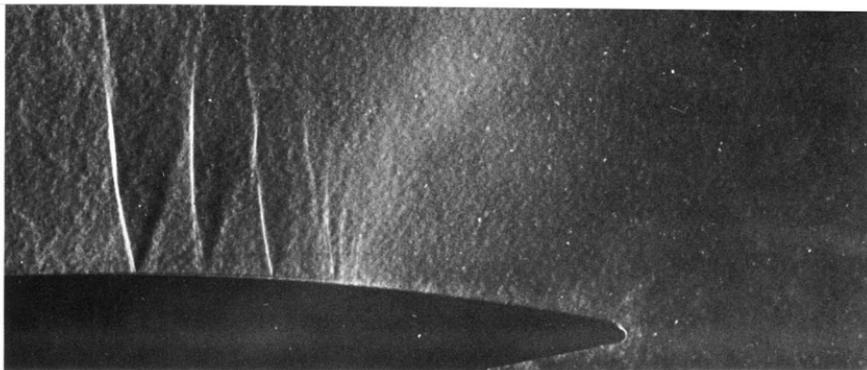
242. Дифракция слабой ударной волны, спускающейся по ступеньке. На теневых фотографиях видна плоская ударная волна с числом Маха 1,3 в ударной трубе. Картина, состоящая из вертикально падающей ударной волны, искривленной дифрагированной волны, а также круговой волны разрежения, увеличивает свои размеры линейно со временем. Вязкий отрыв на углу порождает закручивающуюся вихревую пелену. [Scharidin, 1965], любезно предоставлено Н. Oertel, Sr.

243. Дифракция более сильной ударной волны, спускающейся по ступеньке. При числе Маха падающей ударной волны, увеличенном до 2,4, размер картины по-прежнему продолжает линейно расти со временем, однако сама по себе эта картина становится более сложной, чем на предыдущей серии снимков. Поток в окрестности угла сверхзвуковой, так что никакие возмущения не могут распространяться вверх по потоку. [Scharidin, 1965], любезно предоставлено Н. Oertel, Sr.



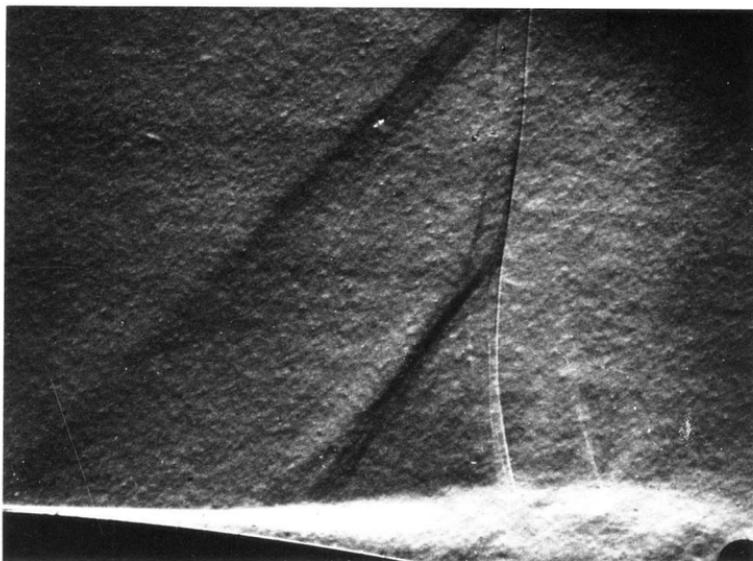
244. Фокусировка ударной волны. Плоская ударная волна с числом Маха 1,3, пришедшая справа, отразилась от параболического цилиндра, видимого у левого края окошка на двух верхних темных снимках. Структура, показанная на первом снимке, состоит из центральной круговой дуги отраженной ударной волны, которая посредством почти горизонтальных волн разрежения соединяется с ударными волнами, дифрагировавшими от углов параболического отражателя. На втором снимке волны разрежения уже пересеклись друг с другом и образовали тройные ударные пересечения посред-

ством маховского отражения. На остальных снимках отражатель сдвинут на один радиус окошка влево. Почти плоская маховская ножка выдвигается из области высокоэнтропийного воздуха в фокальном пятне. На последнем снимке прохождение ударных волн уже закончилось, а течения около линий скольжения, возникших при маховском отражении, становятся турбулентными, расходятся в стороны и сворачиваются вследствие взаимодействия друг с другом. [Sturtevant, Kulkarny, 1976]



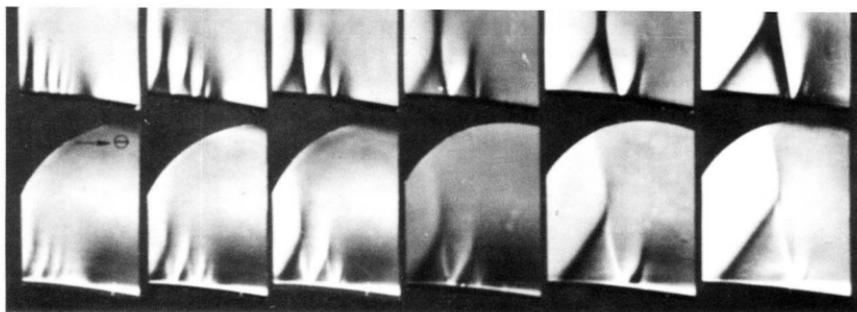
245. Множественные ударные волны на профиле с ламинарным пограничным слоем. Область местного сверхзвукового течения обычно заканчивается ударными волнами, на форму которых оказывает влияние пограничный слой. Если этот слой ламинарен, то сначала появляется последователь-

ность так называемых лямбдаобразных ударных волн. На этой шлирен-фотографии, выполненной при вертикальной кромке ножа, видна картина обтекания двояковыпуклого профиля 12%-ной толщины при числе Маха невозмущенного потока, равном 0,8. Фото Н. W. Liepmann



246. Одиночная лямбдаобразная ударная волна на профиле с ламинарным пограничным слоем. При увеличении числа Маха множественные ударные волны, показанные на предыдущем снимке, сливаются в одну волну. Здесь видно (кромка ножа го-

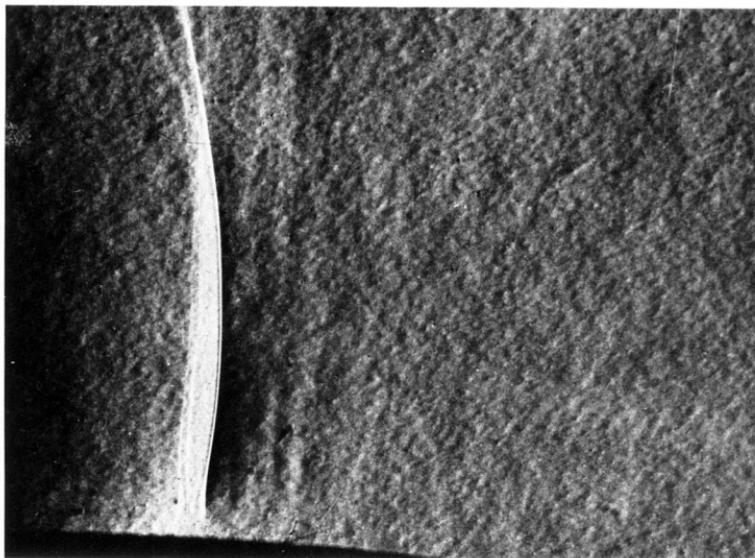
ризонтальна), что при $M = 0,9$ ламинарный пограничный слой оторвался от поверхности двояковыпуклого профиля перед ударной волной и стал турбулентным. Фото Н. W. Liepmann



$M = 1,106 \quad 1,141 \quad 1,195 \quad 1,204 \quad 1,223 \quad 1,303$

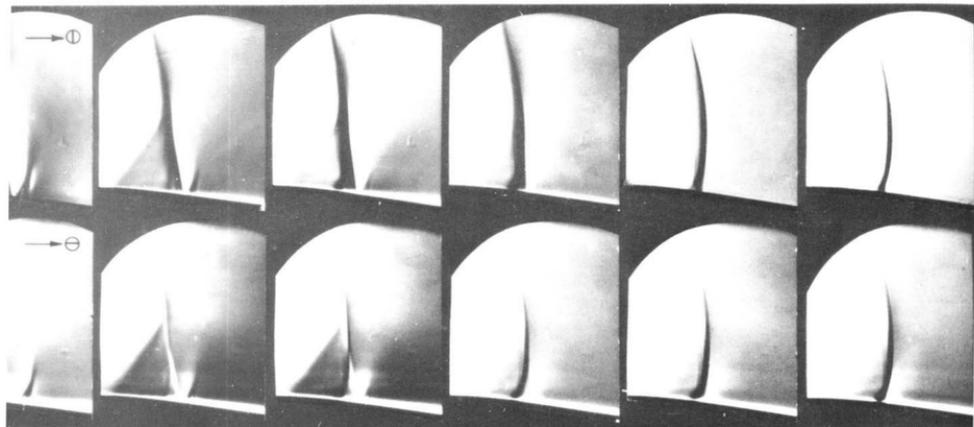
247. Ударные волны над ламинарным пограничным слоем при возрастающих числах Маха. Видно, что при возрастании местного числа Маха, значения которого приводятся под каждой парой шлирен-фотографий, лямбдообразные ударные волны сливаются между собой. Здесь ламинарный пограничный слой формируется на искривленной пластинке,

которая создает растущую ограниченную область сверхзвукового течения, погруженную в дозвуковой поток. Тем самым имитируется сверхкритическое обтекание профиля. Символы на снимках слева указывают, что кромка ножа вертикальна для верхнего ряда, а для нижнего горизонтальна. [Ackeret, Feldmann, Rott, 1946]



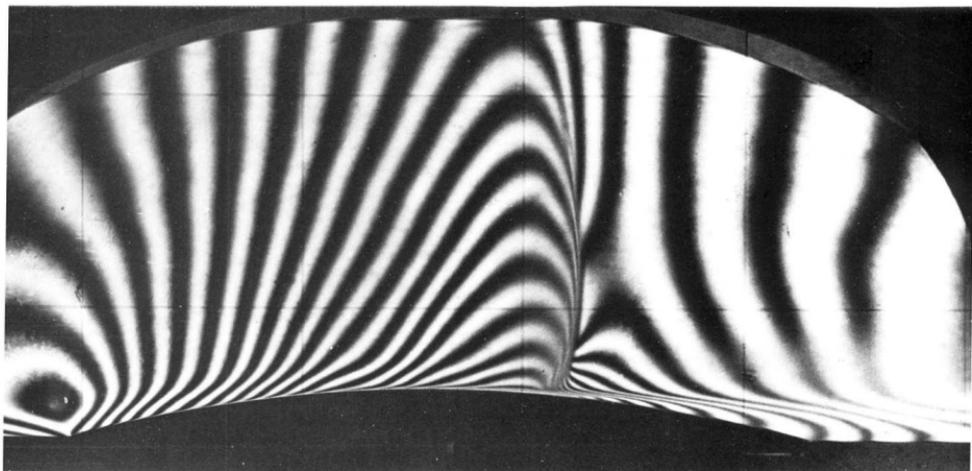
248. Ударная волна на профиле с турбулентным пограничным слоем. Когда пограничный слой турбулентен, появляется одиночная ударная волна. При этом структура течения более близка к невязкой модели, чем при ламинарном пограничном слое.

На снимке число Маха свободного потока равно 0,84, а кромка ножа вертикальна, что позволяет четко показать ударную волну. Фото Н. W. Liepmann



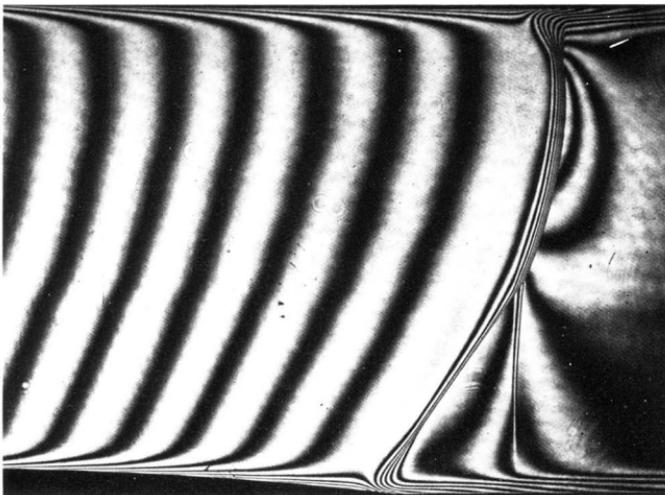
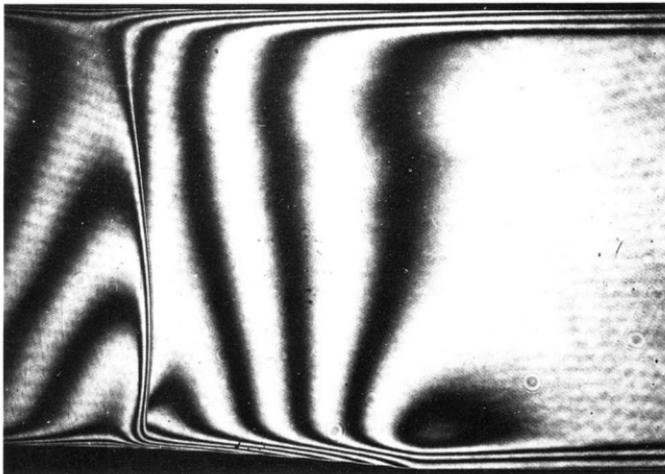
249. Ударные волны над ламинарным пограничным слоем, переходящим в турбулентный. Местное число Маха на искривленной пластинке остается почти неизменным и равным 1,2 или 1,3, тогда как число Рейнольдса удваивается, изменяясь от

1 320 000 слева до 2 640 000 справа. По мере того как ламинарный пограничный слой перед ударной волной становится турбулентным, наклонная ножка лямбдообразной ударной волны постепенно исчезает. [Ackeret, Feldmann, Rott, 1946]



250. Ударная волна при трансзвуковом обтекании выступа. На интерферограмме в полосах бесконечной ширины демонстрируется трансзвуковое течение над образованным дугой окружности 70° -ным выступом на стенке трубы. Местная область сверх-

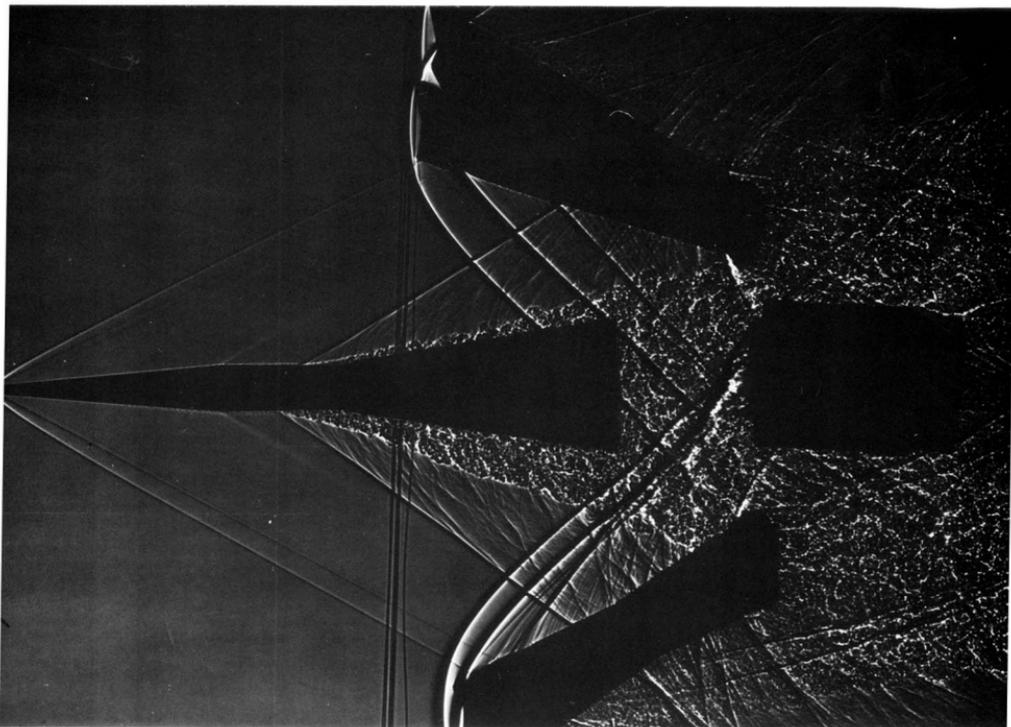
звукового течения заканчивается ударной волной, которая взаимодействует с турбулентным пограничным слоем так же, как на двух предыдущих снимках. [Délery, Chattot, Le Balleur, 1975]



251. Ударная волна, взаимодействующая с турбулентным пограничным слоем в канале. На голографических интерферограммах в полосах бесконечной ширины показано трансзвуковое обтекание длинного выступа с задней частью в форме дуги окружности. На верхнем снимке профиль садится

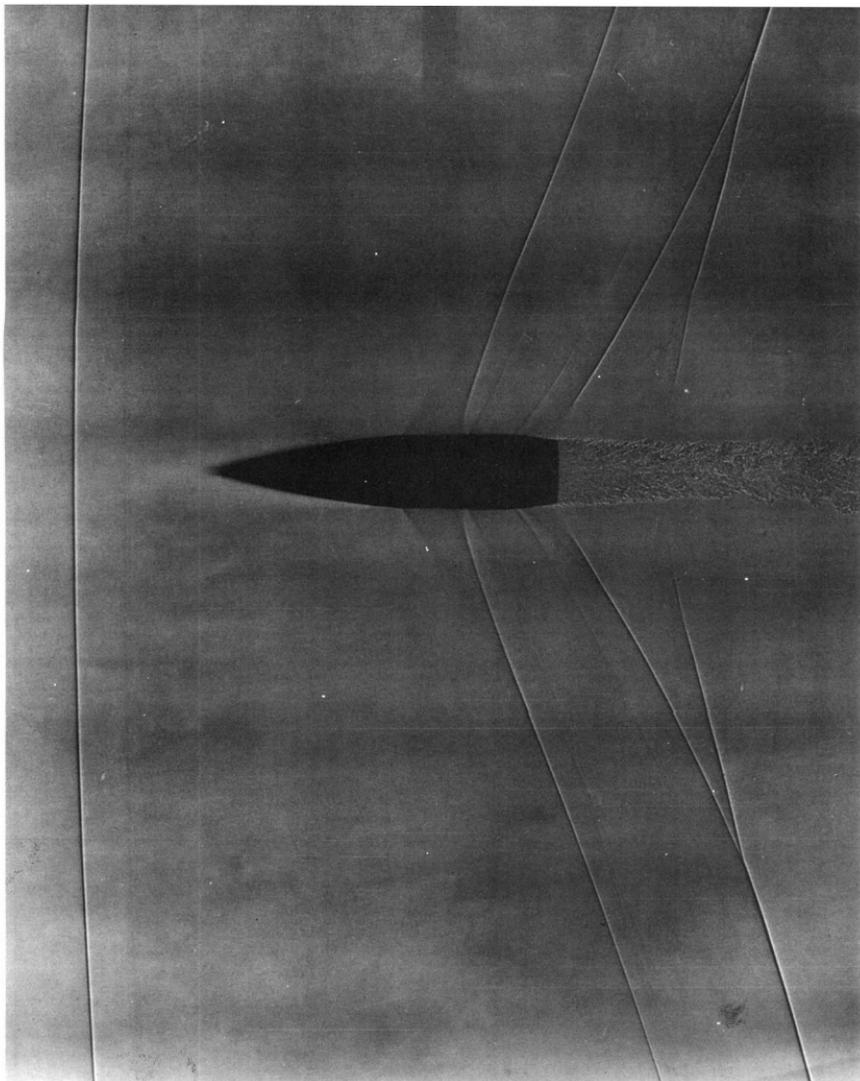
на слабую прямую ударную волну с максимальным числом Маха в области вверх по потоку, равным 1,1. На нижнем снимке от задней кромки отходит лямбдообразная ударная волна. [Déléry, Surget, Lacharme, 1977]

11. Сверхзвуковое течение



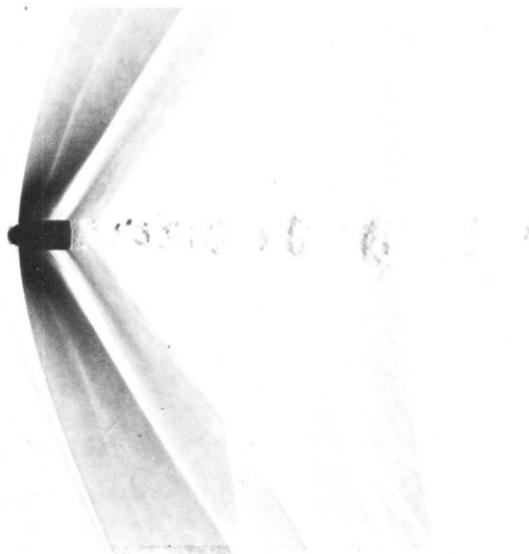
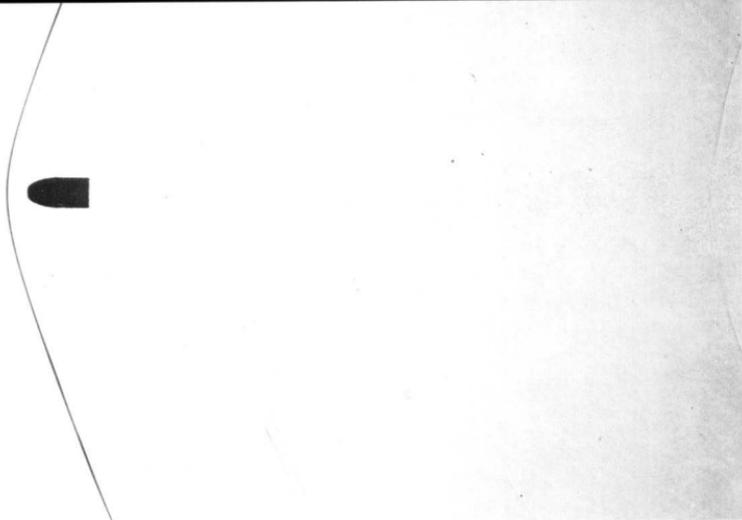
252. Осесимметричная модель, отделяющаяся от своей оболочки. В аэродинамическую трубу навстречу сверхзвуковому потоку выстреливается тело вращения, снабженное оперением, причем результирующее число Маха свободного потока получается равным 2. На теневой фотографии показано, как поток срывает с тела пальцы пластико-

вой оболочки, предохранявшей модель во время выстрела. При этом была порвана сетка из тонких проволочек, что и инициировало вспышку для съемки, подобно тому как это было сделано Махом в 1888 г. на фотографии, полученной теньевым методом и приведенной на стр. 7. Фото NASA, любезно предоставлено W. G. Vincenti



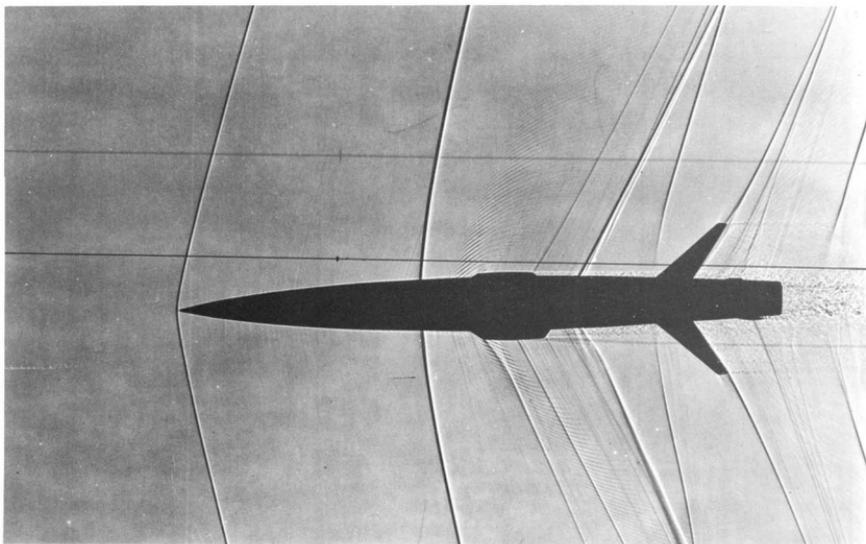
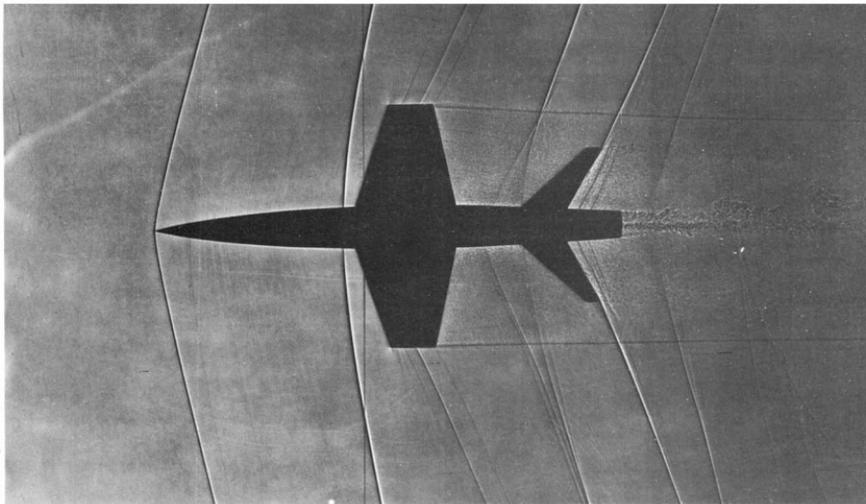
253. Снаряд, движущийся при $M = 1,015$. Модель артиллерийского снаряда, показанная на фото 223 и 224, изображена здесь в более ранней точке своей траектории, когда она летит со скоростью, лишь немного превышающей звуковую. Отходящая головная ударная волна движется перед снарядом, причем дальнее поле течения оказывается сильно

отличающимся от того, которое показано на фото 224 для случая скорости, несколько меньшей скорости звука, хотя поле вблизи тела с этим полем почти совпадает. Это иллюстрирует «замораживание» – стабилизацию ближнего поля, когда число Маха невозмущенного потока проходит через единицу. Фото А. С. Charters



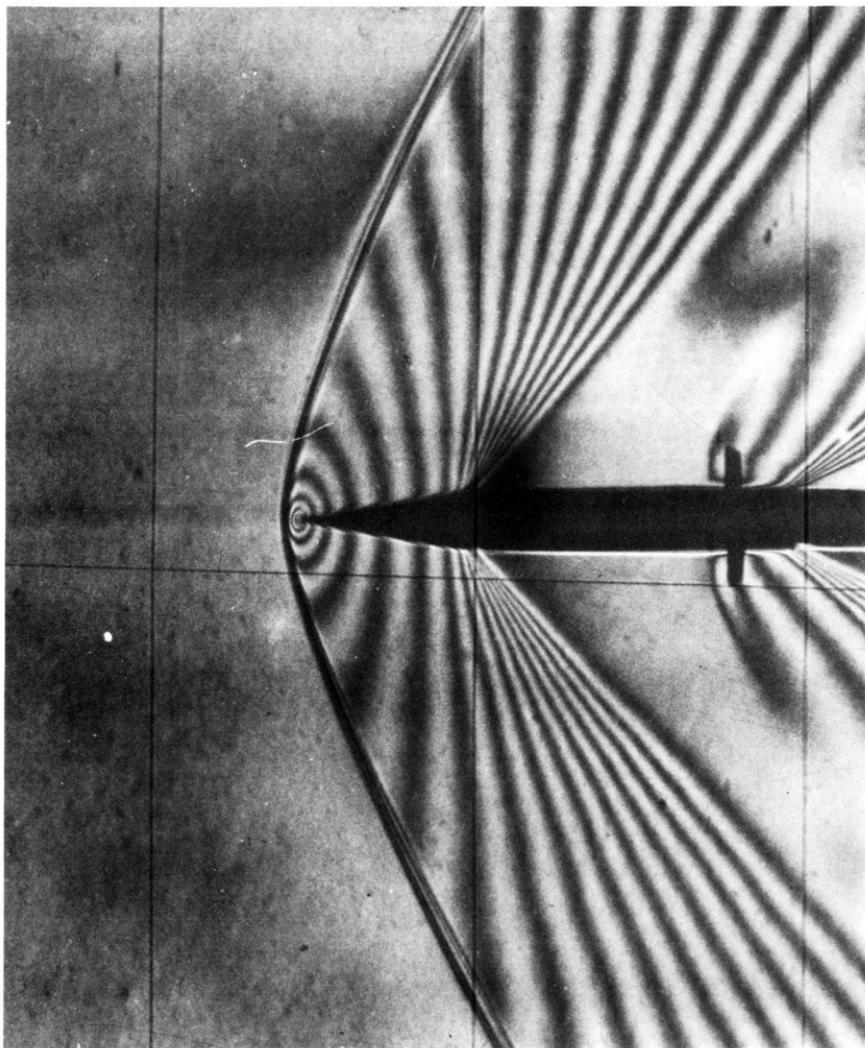
254. Винтовочная пуля при $M = 1,1$. С помощью двух различных оптических методов здесь показаны волновая картина и след винтовочной пули, летящей в атмосферном воздухе со скоростью, несколько превышающей скорость звука. Показанная вверху фотография получена теньвым методом, чувствительным к изменениям второй производной плотности газа. Нижняя, шпирен-фото-

графия, показывает градиенты плотности по нормали к кромке ножа, которая здесь вертикальна (более ранняя версия этих снимков показана на стр. 7). Большие дуги соответствуют пересечениям осесимметричных ударных волн со стеклянными окнами транзвуковой трубы. Фото Р. Wegener



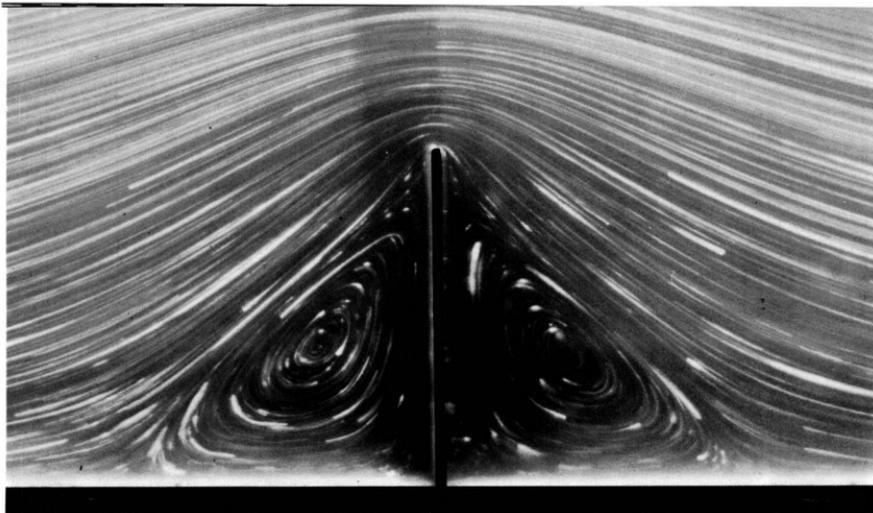
255. Модель самолета в свободном полете при $M=1,1$. На тневых фотографиях показана крылатая модель, запущенная в атмосферный воздух с помощью орудия, как и модель на фото 252. Головная волна при этой небольшой сверхзвуковой скорости почти присоединенная. Как показывает вид в плане (снимок сверху), крылья являются

несущими, о чем свидетельствуют концевые вихри, сходящие с их торцов. На показанном внизу виде сбоку картина, напоминающая рыбий скелет, создается благодаря импульсивным возмущениям давления от канавок на крыле, турбулизирующих пограничный слой на его хвостовой части. Фото NASA, любезно предоставлено W. G. Vincenti



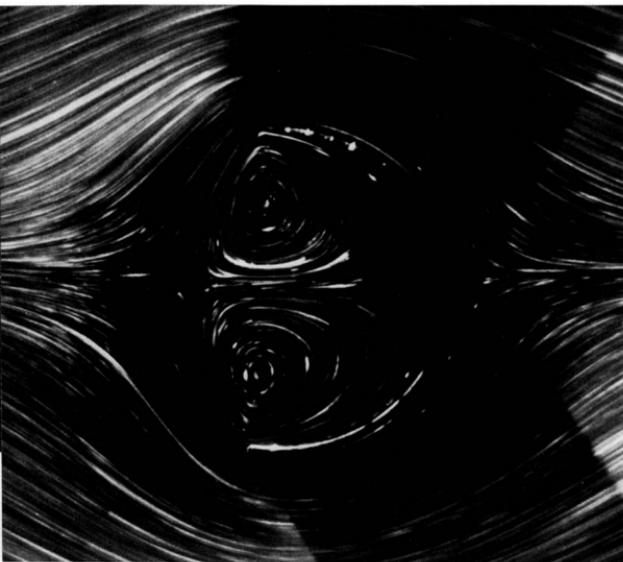
256. Отошедшая ударная волна на тонком клине. Интерферограмма в полосах бесконечной ширины показывает линии постоянной плотности при обтекании комбинации пластины с клином, имеющим полуугол раствора 10° , которая помещена в сверхзвуковой аэродинамической трубе при числе Маха невозмущенного потока, равном 1,32. Го-

ловная ударная волна не может присоединиться к этому клину в воздухе и обеспечить тем самым коническое поле, показанное на фото 228, до тех пор, пока число Маха не превысит значения 1,4. [Ashkenas, Bryson, 1951], любезно предоставлено Н. Ashkenas

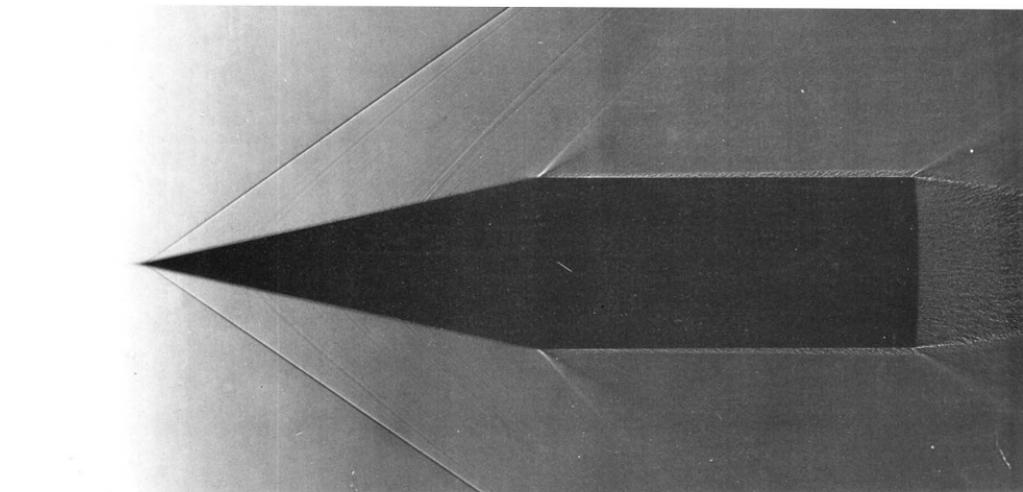


12. Обтекание барьера однородным потоком при $Re = 0,014$. Визуализация с помощью алюминиевого порошка в глицерине показывает в чистом ви-

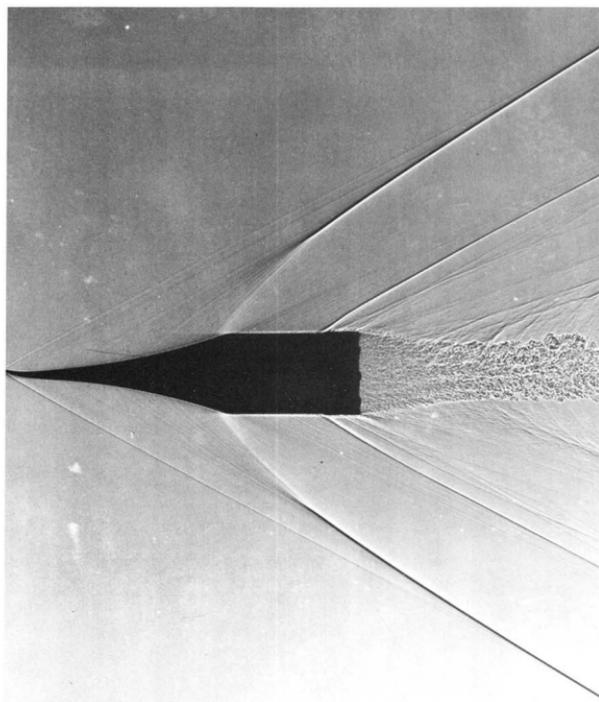
де те области отрыва, которые возникают на предыдущем снимке перед выступом и за ним. [Taneda, 1979]



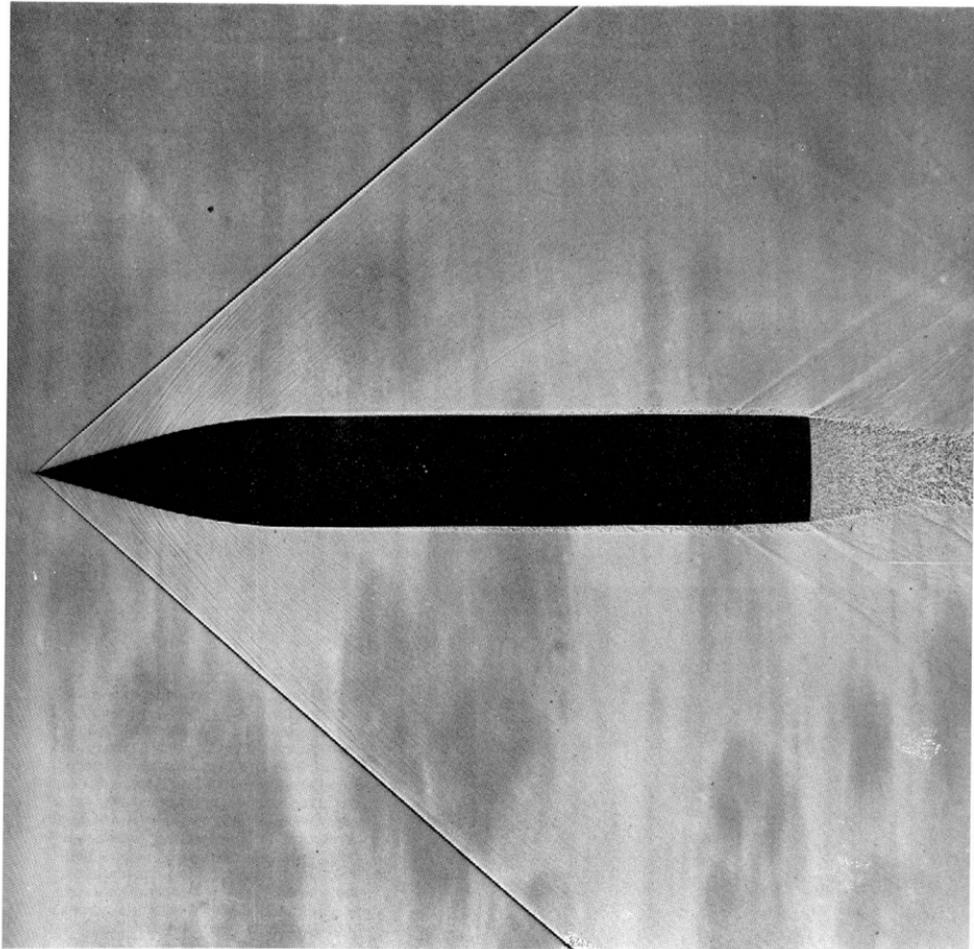
13. Линии тока при обтекании дуги полукруга. При числе Рейнольдса, равном здесь $0,031$, картина линий тока не претерпевает ощутимых изменений, когда направление потока обращается. Центры пары вихрей внутри каверны находятся на расстоянии $0,52$ диаметра, что хорошо согласуется с решением в приближении Стокса. Алюминиевый порошок, диспергированный в глицерине, освещается световым ножом. [Taneda, 1979]



259. Комбинация конуса с цилиндром в сверхзвуковом свободном поле. Комбинация цилиндра с конусом, имеющим полуугол раствора $12,5^\circ$, выстреливается в воздух при $M = 1,84$. На небольшом расстоянии за вершиной конуса пограничный слой становится турбулентным и порождает волны Маха, видимые на этой теневой фотографии. Фото А. С. Charters

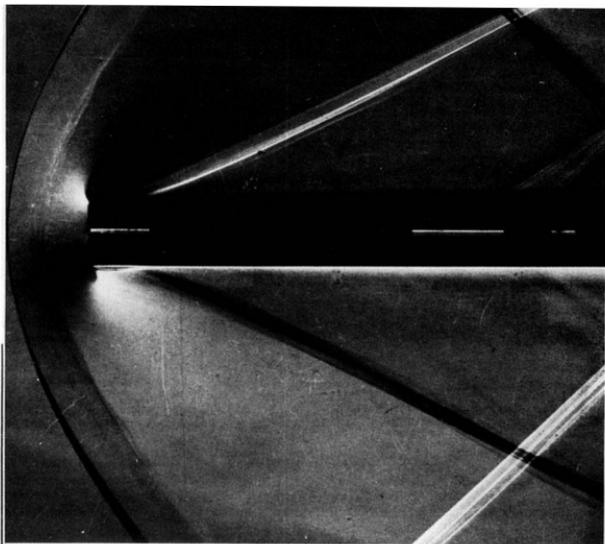


260. Безударная головная часть тела. При числе Маха, равном 2,1, вогнутая носовая часть этого тела вращения обеспечивает плавное сжатие, требуемое для безударного диффузора. Головная ударная волна образуется только на некотором расстоянии от тела, создавая осесимметричный аналог течения, показанного на фото 227. К сожалению, при выстреле кончик тела погнулся, что привело к образованию там слабой ударной волны. Фото из Transonic Range, U. S. Army Ballistic Research Laboratory

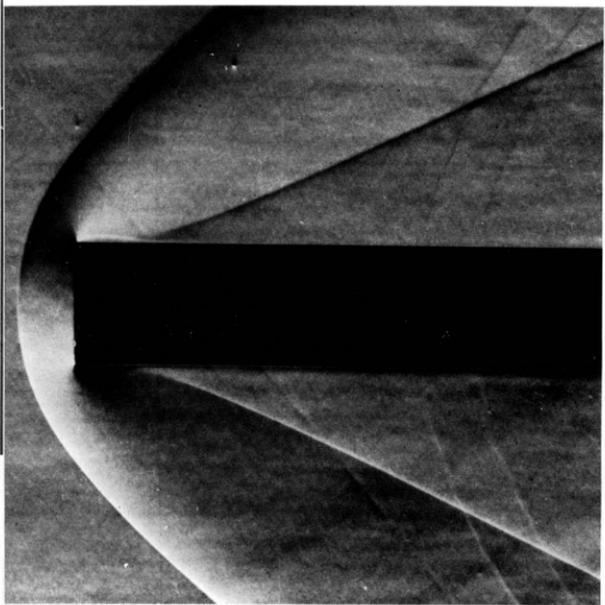


261. Комбинация цилиндра с оживалом в свободном полете при $M = 2,58$. Эта теневая фотография демонстрирует с замечательной подробностью структуру сверхзвукового обтекания длинного тела вращения под малым углом атаки: первоначально прямую головную волну, идущую от конического заострения конечного размера, слабые ударные волны, порождаемые шероховатостью

носовой части, утолщающийся турбулентный пограничный слой на цилиндрической средней части тела, вееры разрежения у начала конической хвостовой части, а также у основания тела и, наконец, нестационарные ударные волны, идущие от нестационарного турбулентного следа. Фото из Transonic Range, U. S. Army Ballistic Research Laboratory

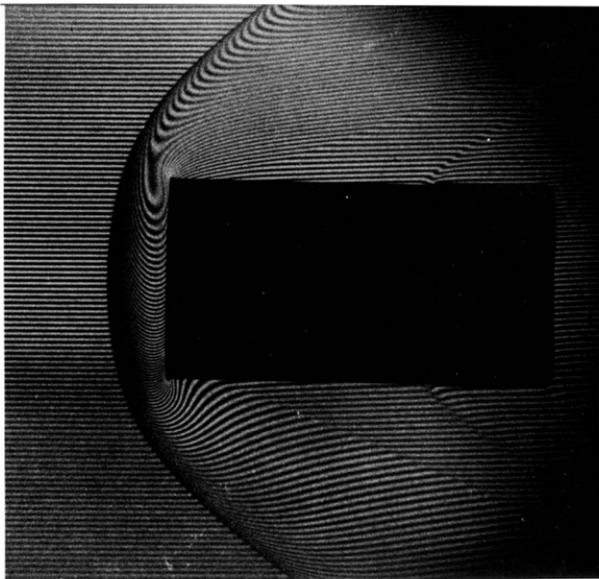


262. Пластика с плоской передней частью при $M = 2,0$. При выполнении этого снимка шлирен-методом кромка ножа была горизонтальной, поэтому все, что сверху представляется светлым, снизу выглядит темным. Щели в середине пластинки не оказывают влияния на течение воздуха. Искривленная линия непосредственно вниз по потоку за отошедшей головной ударной волной представляет пересечение этой волны с пограничными слоями на стеклянных боковых стенках аэродинамической трубы. В угловой точке происходит отрыв пограничного слоя, а его вторичное присоединение отмечается образованием косых ударных волн. [Maig, 1952], любезно предоставлено N. Johannesen

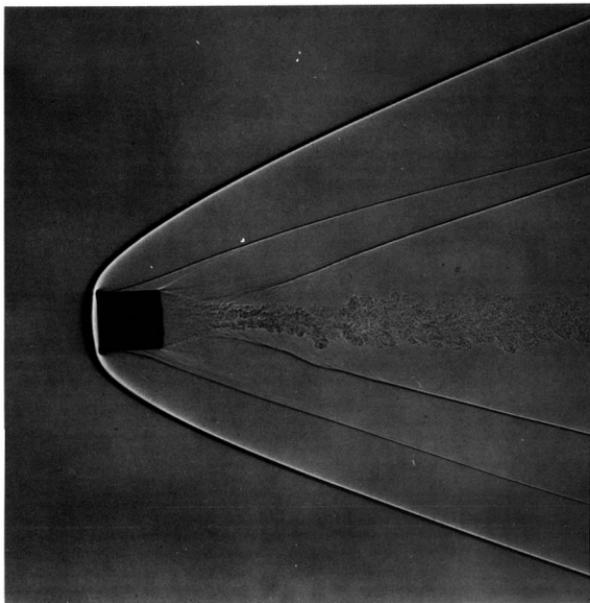


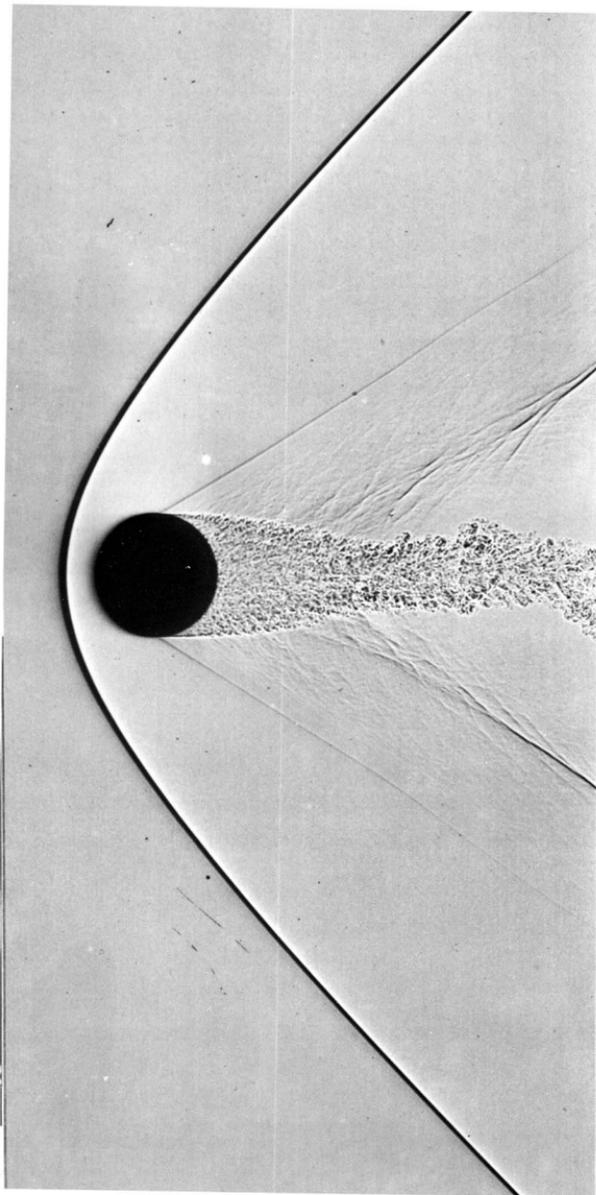
263. Цилиндр с плоской передней частью при $M = 2,0$. Сравнение с предыдущим снимком показывает, что расстояние отхода головной ударной волны для осесимметричного тела примерно вдвое меньше, чем для плоского тела того же поперечного сечения при том же числе Маха. Во всех остальных отношениях структура течения остается примерно такой же – видна точка отрыва и косая ударная волна в месте обратного присоединения. Головная волна пересекает пристеночные пограничные слои по двум кривым линиям справа. [Johannesen, 1958]

264. Цилиндр, движущийся при $M = 2,77$ в углекислом газе. Интерферограмма в полосах конечной ширины показывает круговой цилиндр в свободном полете. Видна головная волна, располагающаяся несколько ближе к плоской поверхности, чем на предыдущем снимке, что связано, во-первых, с большей величиной числа Маха свободного потока и, во-вторых, с меньшей величиной показателя адиабаты, равного $4/3$ для углекислого газа в отличие от $7/5$ для воздуха. Видна также ударная волна в точке вторичного присоединения пограничного слоя, за которой имеется вторая косая ударная волна, идущая от выступа на цилиндре. Фото из Air Flow Branch, U. S. Army Ballistic Research Laboratory

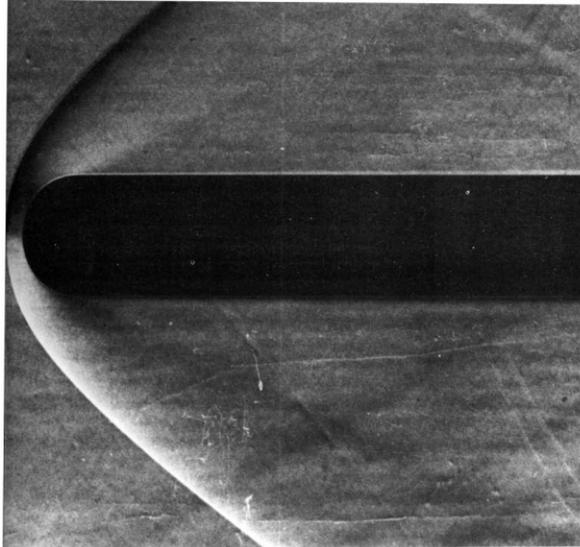


265. Цилиндр, движущийся при $M = 3,6$ в воздухе. На теневой фотографии показан круговой цилиндр в свободном полете при небольшом отрицательном угле атаки. Кажущаяся расплюснутость переднего торца объясняется на самом деле оптическим искажением. Видно, что косая ударная волна, идущая от точки обратного присоединения пограничного слоя, сливается с волной, идущей от следа. На больших расстояниях эти волны образуют хвостовую часть всплеска давлений от N-образной волны, показанной для случая сферы на фото 269 и характерной для случая любого объекта в сверхзвуковом полете. Фото А. С. Charters

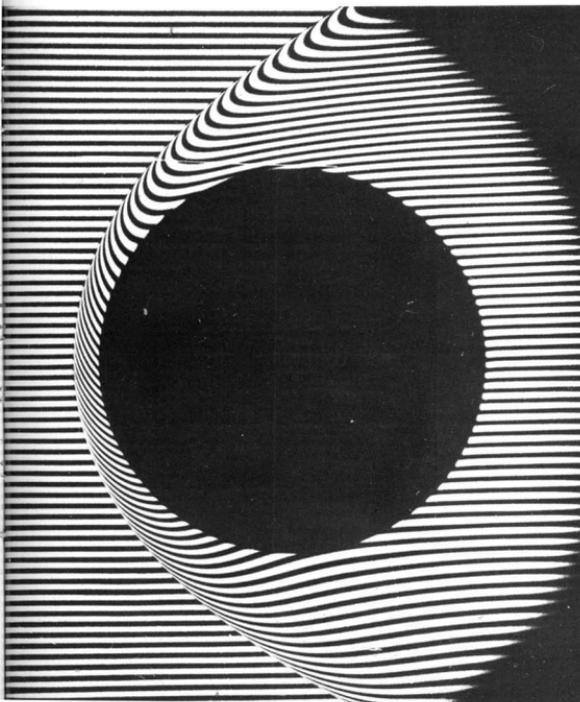




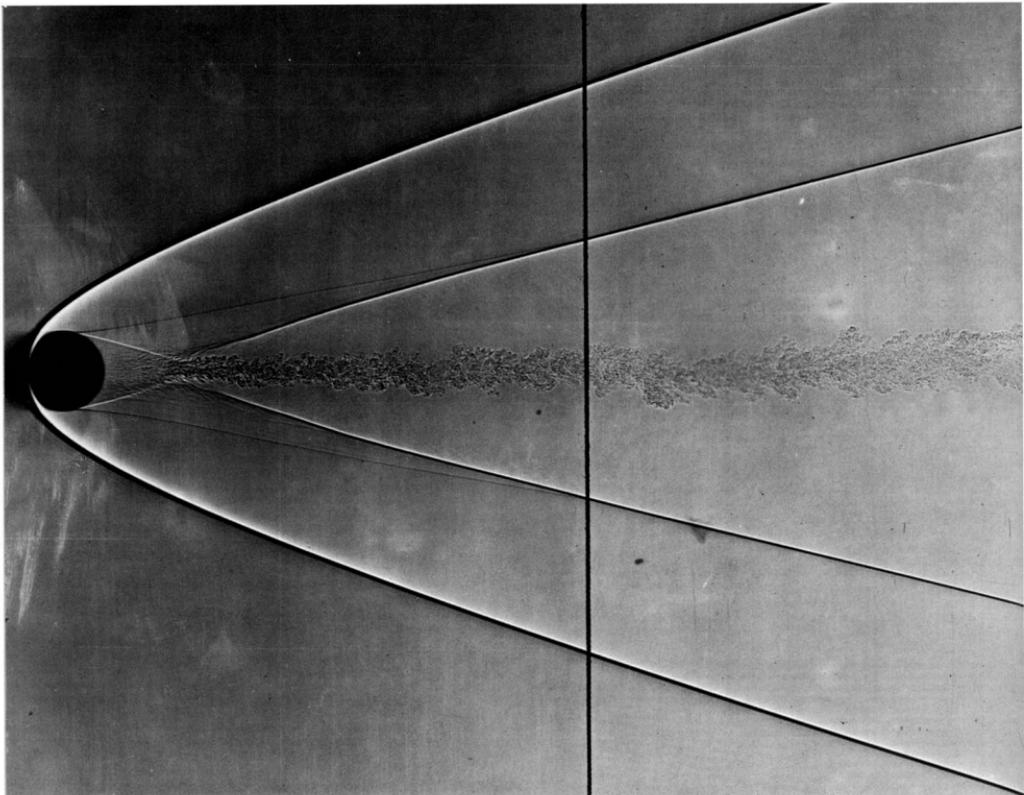
266. Шар, движущийся при $M = 1,53$. На теневой фотографии показан шар диаметром $1/2$ дюйма, схваченный при его движении в воздухе. За тем участком головной волны, который находится непосредственно перед шаром вдоль его поверхности вплоть до угла 45° , течение дозвуковое. На угле примерно 90° ламинарный пограничный слой отрывается, создавая косую ударную волну, и быстро становится турбулентным. Флюктуирующий след порождает систему слабых возмущений, постепенно сливающихся во вторую ударную волну. Фото А. С. Charters



267. Комбинация полусферы с цилиндром, движущаяся при $M = 1,96$. На шпирен-фотографии при горизонтальной кромке ножа показан пограничный слой на цилиндре. Число Рейнольдса, рассчитанное по радиусу затупления, равно 82 000. Нет никаких признаков отрыва в месте соединения сферы с цилиндром. [Maig, 1952], любезно предоставлено N. Johannesen

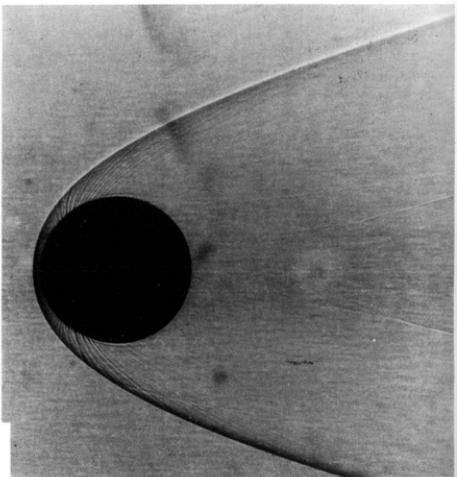


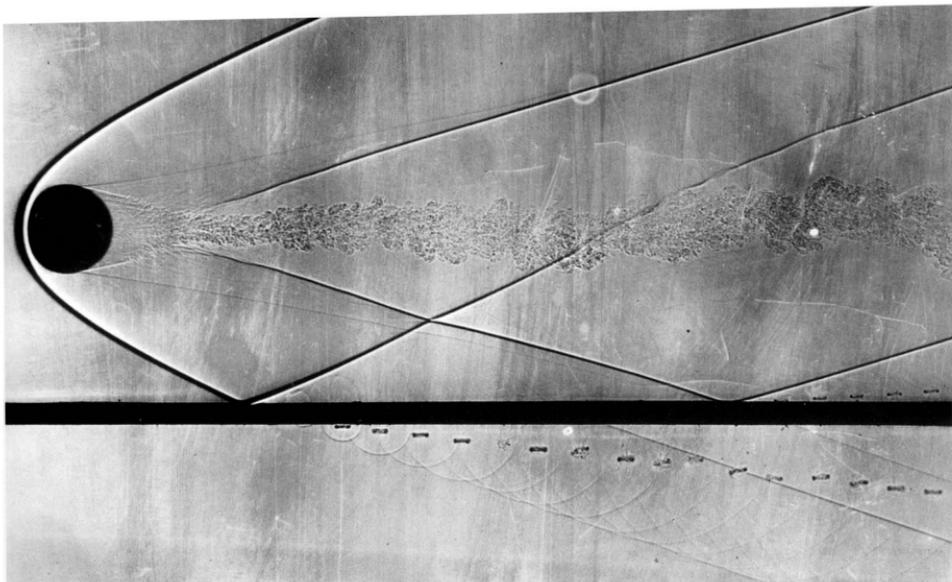
268. Шар, движущийся при $M = 5,7$. Интерферограмма в полосах конечной ширины чрезвычайно четко выявляет отошедшую головную волну, однако не дает возможности судить о деталях пограничного слоя и следа, видимых на теневой фотографии, помещенной на следующей странице. Фото из U. S. Army Ballistic Research Laboratory



269. Шар, движущийся при $M = 4,01$. Теневая фотография шара диаметром 1/2 дюйма в свободном полете в атмосферном воздухе демонстрирует отрыв пограничного слоя непосредственно за экватором, сопровождаемый слабой ударной волной, а также формирование N-образной волны, слышимое вдали в форме двойного гулкового удара. Вертикальная линия – нить координатника. Фото А. С. Charters

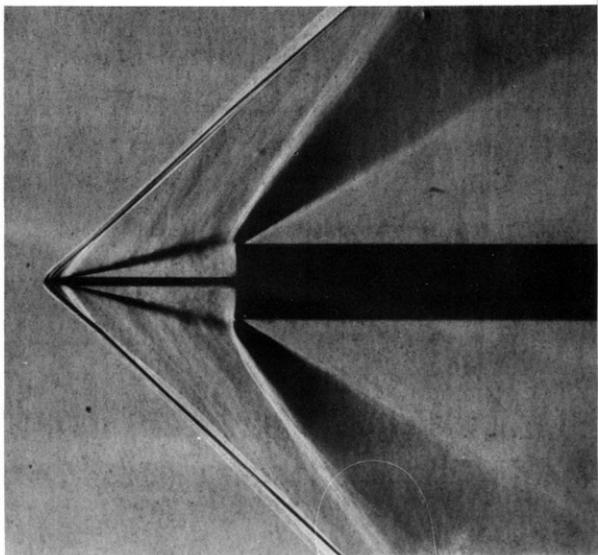
270. Шар, движущийся при $M = 7,6$. Нейлоновый шар находится в полете в атмосферном воздухе. При столь высоком числе Маха головная волна прижимается ближе к передней части тела. Волны Маха, отходящие вниз по потоку от поверхности, отмечают заднюю границу дозвуковой области. Фото U. S. Navy, Naval Surface Weapons Center, Silver Spring, Maryland

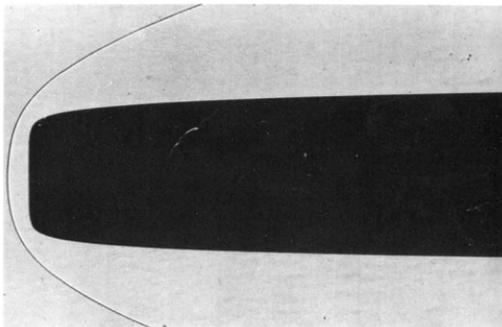
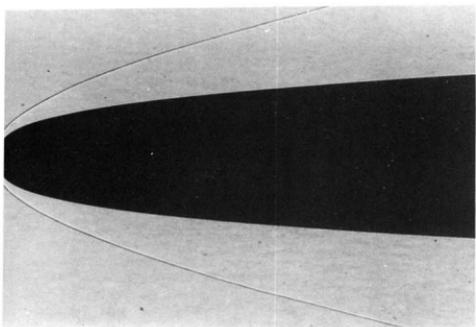
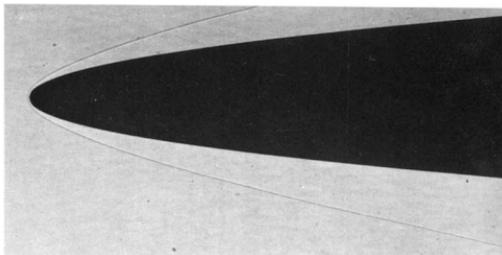
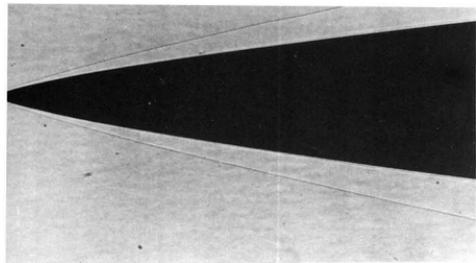




271. Шар, движущийся над перфорированной пластинкой. На теневой фотографии показан шар диаметром $9/16$ дюйма, выстреленный параллельно поверхности пластинки с рядом отверстий размером $1/16$ дюйма, просверленных через $1/4$ дюйма одно от другого. Давление, создаваемое головной ударной волной, создает под пластинкой классическую диаграмму конуса Маха как огибающей поверхности расширяющихся сферических акустических волн. Эта диаграмма, как видно из снимка, была использована для измерения числа Маха, равного 3. У каждого отверстия образуется небольшое вихревое кольцо, движущееся вниз по потоку и сопровождаемое справа вторичным кольцом, поднимающимся вверх. Фото из U. S. Army Ballistic Research Laboratory

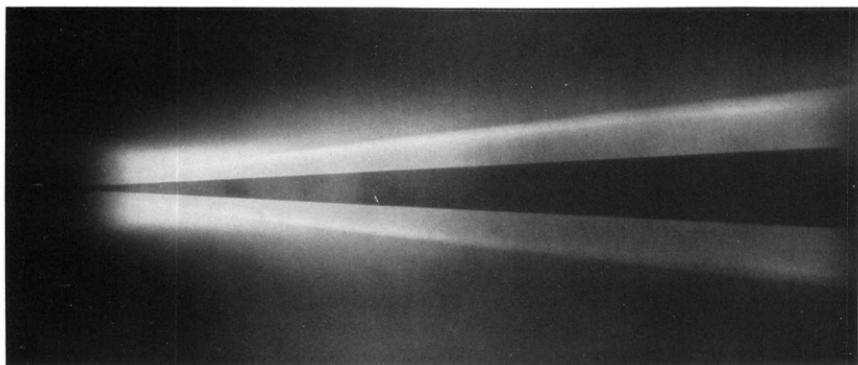
272. Обтекание клиновидной застойной области. На шлирен-фотографии показан поток, отрывающийся при числе $M = 1,96$ от тонкой пластинки и обратно присоединяющийся в угловых точках более толстой пластинки. По своей структуре течение напоминает то, которое получается в случае сплошной клиновидной передней кромки и включает прямую головную ударную волну, за которой в угле следует разрежение Прандтля-Майера. Фото W. A. Maig, любезно предоставлено N. Johannesen





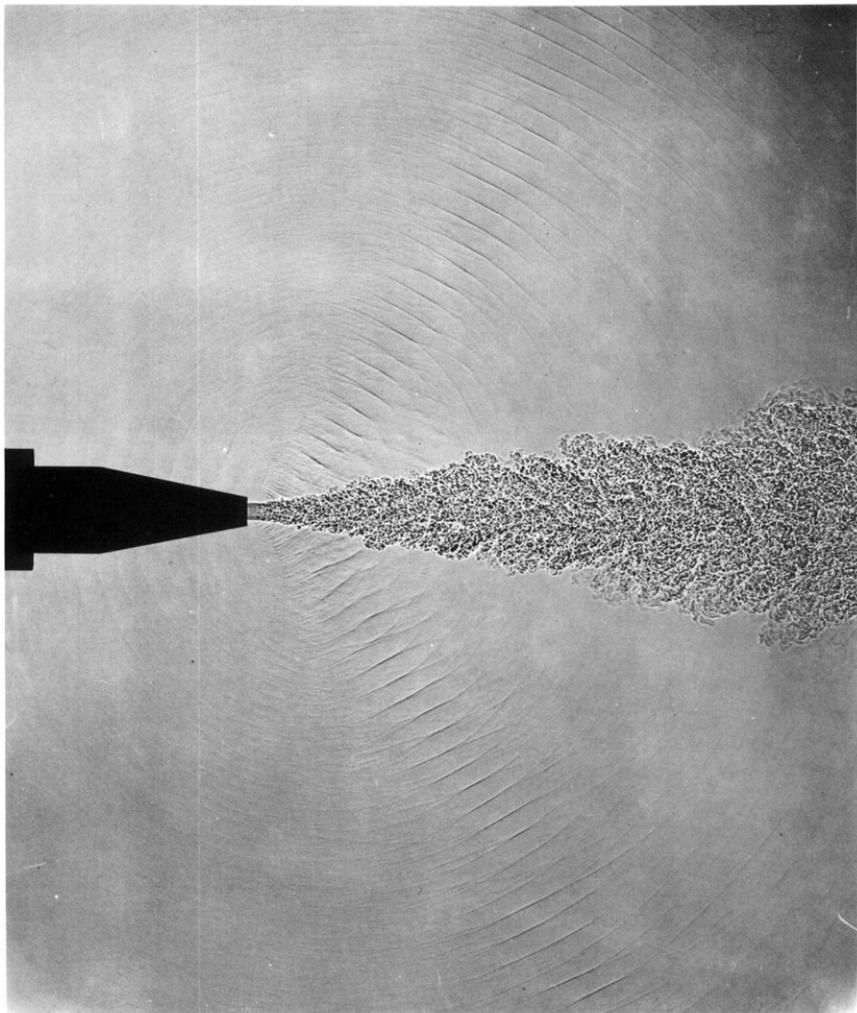
273. Гиперзвуковое обтекание тел со степенными контурами. На теневых фотографиях показана головная волна в воздухе при $M = 8,8$ для тел вращения, радиус которых изменяется пропорционально некоторой степени расстояния вдоль оси. Показа-

тели степени равны $3/4$, $1/2$ (параболоид вращения), $1/3$ и $1/10$. [Freeman, Cash, Bedder, 1964], при любезном содействии Aerodynamics Division, National Physical Laboratory



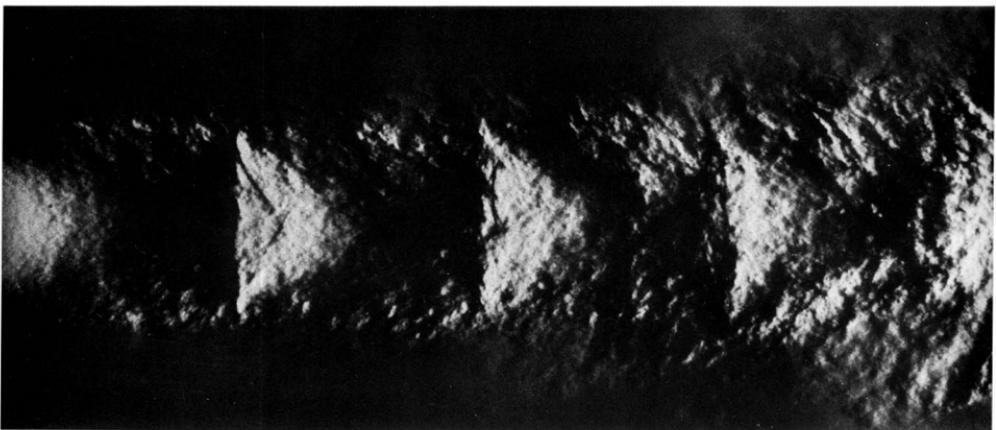
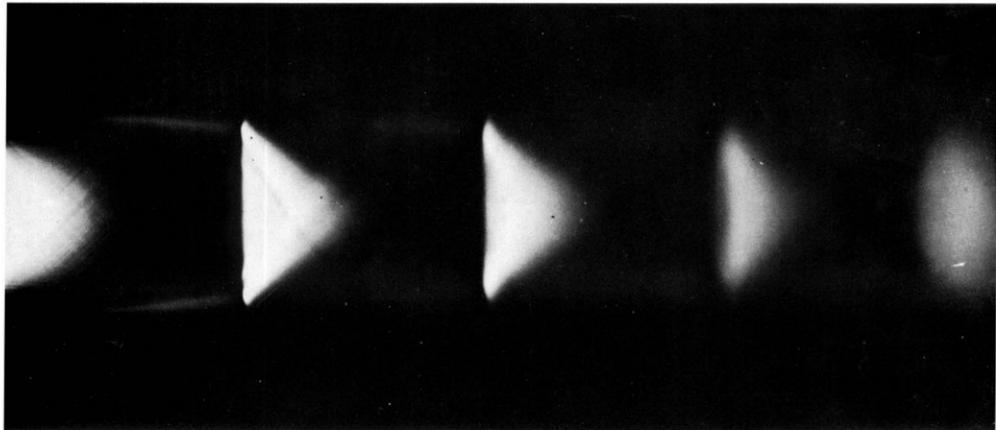
274. Гиперзвуковое обтекание тонкого конуса. Конус с полууглом раствора 3° показан здесь с применением метода тлеющего разряда при обтекании его гелием с числом Маха 41 и числом Рейнольдса, рассчитанным по длине и равным

560 000. В этом режиме сильного взаимодействия видно, что пограничный слой занимает примерно четыре пятых расстояния от тела до ударной волны. [Horstman, Kussoy, 1968]



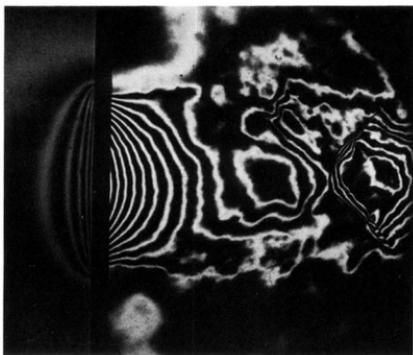
275. Периодические волны, порождаемые сверхзвуковой струей. Осесимметричная ламинарная струя гелия, вытекающая в воздух из сужающегося сопла диаметром 0,26 см, становится турбулентной в пределах одного диаметра вниз по потоку. После этого струя начинает излучать слабые ударные волны с частотой 85 кГц, направленные в основ-

ном вдоль конуса с полууглом раствора 60° от оси. Волны вверх и вниз не совпадают по фазе, причем сдвиг фазы происходит при переходе через осевую плоскость, нормальную к плоскости снимка. Фото J. H. Woolley. [Westley, Lindberg, Chan, Lee, 1972]

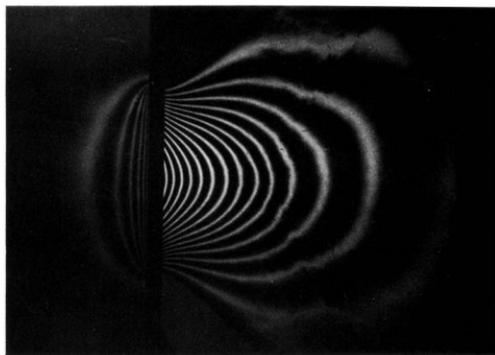


276. Фотографии сверхзвуковой струи, сделанные с малой и большой выдержкой. Сухой воздух вытекает из сужающегося конического сопла, имеющего на выходе диаметр 1 см. Отношение давления торможения к атмосферному давлению равно 3,13; это дает осесимметричную струю с числом

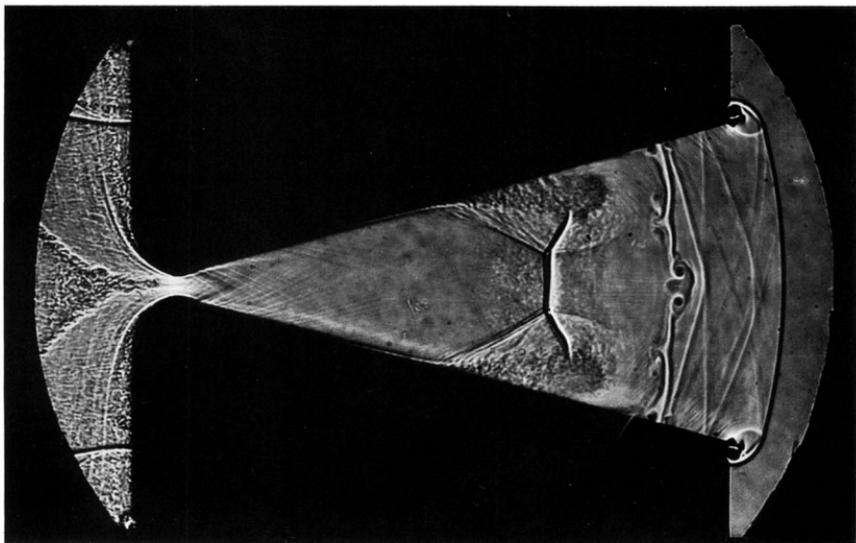
Маха 1,4. Верхняя теньевая фотография, сделанная с выдержкой 10^{-2} с, демонстрирует осредненное течение с серией волн разрежения и сжатия. Нижняя фотография, полученная при выдержке $0,5 \cdot 10^{-6}$ с, показывает более сложную мгновенную структуру течения. Фото N. Johannesen



277. Истечение через круглое отверстие. Воздух вытекает через круглое отверстие с острыми кромками диаметром 5 см. Отношение давлений равно 0,24 на левом снимке и 0,0072 на правом. Первая интерферограмма демонстрирует вниз по потоку

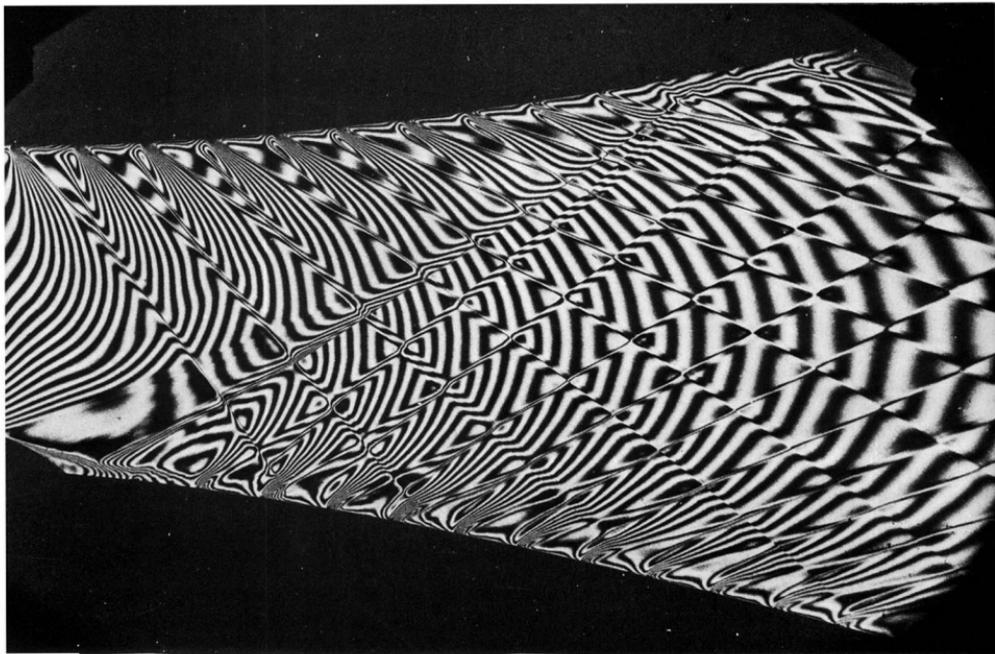


от отверстия почти параллельную струю с сильным турбулентным перемешиванием и ударными волнами. На второй интерферограмме видно расширение гиперзвуковой струи. Фото W. J. Hiller, G. E. A. Meier



278. Процесс запуска в сопле. Падающая ударная волна, движущаяся с числом Маха скачка, равным 3, только что прошла через плоское сопло. За этой волной имеется несколько контактных поверхностей, содержащих вихри (см. фото 240); между этими поверхностями и горловиной сопла – вторая

ударная волна, направленная против течения, но сносимая вниз по потоку и вызывающая отрыв пограничных слоев. Волны Маха, отходящие от стенок, указывают на установление сверхзвукового течения вниз по потоку от горловины. [Amann, 1971]



279. Сверхзвуковое сопло при наличии возмущений, идущих от стенок. Эта интерферограмма демонстрирует течение в плоском сопле Лавала, имеющем возмущающий цилиндр на нижней поверхности горловины, которое моделирует течение в

ракетном двигателе при наличии возмущений. Для генерирования слабых ударных волн (линий Маха) на стенках сопла нанесены канавки треугольного сечения глубиной около 0,3 мм. [Hiller, Meier, 1975]

Литература

- Ackeret J., Feldmann F., Rott N.-Mitt. Inst. Aerodyn. Zürich, 1946, no. 10; NACA Tech. Memo. no 1113, 1947.
- Ackeret J., Rott N.-Schweizer. Bauz. 1949, 67, S. 40-41, 58-61.
- Amann H.-O.-Z. Flugwiss., 1971, 19, S. 393-406.
- Ashkenas H. I., Bryson A. E.-J. Aeronaut. Sci. 1951, 18, p. 82-90.
- Bardsley O., Mair W. A.-Philos. Mag., 1951, 42, p. 29-36.
- Benjamin T. B.-Proc. Roy. Soc. London. Ser. A, 1967, 299, p. 59-75.
- Bippes H.-Sitzungsber. Heidelb. Akad. Wiss. Math. Naturwiss. Kl., 1972, no. 3, S. 103-180; NASA TM-75243, 1978.
- Blake J. R., Gibson D. C.-J. Fluid Mech., 1981, 111, p. 123-140.
- Bleakney W., Weimer D. K., Fleicher C. H.-Rev. Sci. Instrum., 1949, 20, p. 807-815.
- Bradshaw P. Experimental Fluid Mechanics.-Oxford: Pergamon Press, 1970.
- Bradshaw P., Ferriss D. H., Johnson R. F.-J. Fluid Mech., 1964, 19, p. 591-624.
- Brown F. N. M.-Cm. Wind Blow. Dept. Aerospace and Mech. Eng., Univ. Notre Dame, 1971.
- Brown G. L., Roshko A.-J. Fluid Mech., 1974, 64, p. 775-816.
- Burkhalter J. E., Koschmieder E. L.-Phys. Fluids, 1974, 17, p. 1929-1935.
- Cantwell B. J.-Ann. Rev. Fluid Mech., 1981, 13, p. 457-515.
- Cantwell B., Coles D., Dimotakis P.-J. Fluid Mech., 1978, 87, p. 641-672.
- Corrsin S., Karweit M.-J. Fluid Mech., 1969, 39, p. 87-96.
- Corrsin S., Kistler A. L.-NACA Tech. Note no. 3133; 1954, NACA Rept. 1244, 1955.
- Coutanceau M.-J. Méc., 1968, 7, p. 49-67.
- Coutanceau M.-C. R. Acad. Sci., Ser. A, 1972, 274, p. 853-856.
- Coutanceau M., Bouard R.-J. Fluid Mech., 1977, 79, p. 231-256.
- Coutanceau M., Thizon P.-J. Fluid Mech., 1981, 107, p. 339-373.
- Crapper G. D., Dombrowski N., Jepson W. P., Pyott G. A. D.-J. Fluid Mech., 1973, 57, p. 671-672.
- Crow S. C.-AIAA J., 1970, 8, p. 2172-2179. [Имеется перевод: Ракетная техника и космонавт., 1970.]
- Déléry J., Schattot J. J., LeBalleur J. C.-AGARD Conf. Proc. 168, paper 27, 1975.
- Déléry J., Surget J., Lacharme J.-P.-Rech. Aérop. no. 1977-2, 1977, p. 89-101.
- Didden N.-Mitt. Max-Planck-Inst. Strömungsforsch. Aerodyn. Versuchsanst. no. 64, 1977.
- Didden N.-Z. angew. Math. Phys., 1979, 30, S. 101-116.
- Dimotakis P. E., Lye R. C., Papantoniou D. Z.-Proc. XV Int. Symp. Fluid Dyn., 1981, Jachranka, Poland.
- Dymnt A., Flodrops J. P., Gryson P.-In: Flow Visualization II, W. Merzkirch, ed., 1982, p. 331-336.-Washington: Hemisphere.
- Dymnt A., Gryson P.-Inst. Méc. Fluides Lille, 1978, no. 78-5.
- Dymnt A., Gryson P., Ducruet C.-Euromech Colloq. no. 135, Marseilles, France.
- Eckert E. R. G., Soehngen E. E.-U. S. Air Force Tech. Rept. 5747, 1948.
- Eckert E. R. G., Soehngen E.-Trans. ASME, 1952, 74, p. 343-347.
- Falco R. E.-Phys. Fluids, 1977, 20, p. S124-S132.
- Falco R. E.-AIAA J., 1980, 18, p. 1356-1360.
- Fletcher M.-1969 Jahrb. DGLR 77-85, 1969.
- Freeman N. C., Cash R. F., Bedder D.-J. Fluid Mech., 1964, 18, p. 379-384.
- Fultz D., Long R. R., Owens G. V., Bohan W., Kaylor R., Weil J.-Meteorol. Monogr. 1959, 4, no. 21.
- Fultz D., Spence T. W.-In: Atmos. Sci., Paper no. 122, 1967, E. R. Reiter, J. L. Rasmussen, eds., Colo. State Univ.
- Gebhart B. Heat Transfer.-New York: McGraw-Hill, 1971.
- Gebhart B., Diring R. P.-J. Heat Transfer, 1967, 89, p. 274-275.
- Gebhart B., Pera L., Schorr A. W.-Int. J. Heat Mass Transfer, 1970, 13, p. 161-171.
- Glass I. I. Shock Waves and Man.-Toronto: Univ. Toronto Press, 1974.
- Griffith W. C., Bleakney W.-Amer. J. Phys., 1954, 22, p. 597-612.
- Grigull U., Hauf W.-Proc. 3rd Int. Heat Transfer Conf., 1966, 2, p. 182-195.
- Hatfield D. W., Edwards D. K.-Int. J. Heat Mass Transfer, 1981, 24, p. 1019-1024.
- Head M. R.-In: Flow Visualization II, W. Merzkirch, ed., 1982, p. 399-403.-Washington: Hemisphere.
- Head M. R., Bandyopadhyay P.-J. Fluid Mech., 1981, 107, p. 297-338.
- Hiller W. J., Meier G. E. A.-Bericht 10/1971, Max-Planck-Inst. Strömungsforsch., Göttingen, 1971.
- Hiller W. J., Meier G. E. A.-In: E. A. Müller, 50 Jahre Max-Planck-Institut für Strömungsforschung, Göttingen, 1975.
- Honji H., Taneda S.-J. Phys. Soc. Japan, 1969, 27, p. 1668-1677.
- Hornby R. P., Johannsen N. H.-J. Fluid Mech., 1975, 69, p. 109-128.
- Horstman C. C., Kussoy M. I.-AIAA J., 1968, 6, p. 2364-2371.
- Hoyt J. W., Taylor J. J.-J. Fluid Mech., 1977, 83, p. 119-127.
- Hoyt J. W., Taylor J. J.-In: Flow Visualization II, W. Merzkirch, ed., 1982, p. 683-687. Washington: Hemisphere.
- Johannesen N. H.-Philos. Mag., 1952, 43, p. 568-580.
- Johannesen N. H.-Oil, 1958, 4, p. 22-26.
- Kármán T. von.-J. Aeronaut. Sci., 1947, 14, p. 373-402.
- Karweit M. J., Corrsin S.-Phys. Fluids, 1975, 18, p. 111-112.
- Kline S. J. Flow Visualization, 1963, motion picture available from Encyclopedia Britannica Film Cent., Chicago.
- Kline S. J., Reynolds W. C., Schrauf F. A., Runstadler P. W.-J. Fluid Mech., 1967, 30, p. 741-773.
- Kobayashi R., Kohama Y., Takamada Ch.-Acta Mech., 1980, 35, p. 71-82.
- Koschmieder E. L.-Beitr. Phys. Atmos., 1966, 39, p. 208-216.
- Koschmieder E. L.-J. Fluid Mech., 1972, 51, p. 637-656.
- Koschmieder E. L.-Adv. Chem. Phys., 1974, 26, p. 177-212.
- Koschmieder E. L.-J. Fluid Mech., 1979, 93, p. 515-527.
- Lauterborn W.-In: Cavitation and Inhomogeneities in Underwater Acoustics, W. Lauterborn, ed., 1980.-New York: Springer-Verlag.
- Magarvey R. H., MacLachy C. S.-Can. J. Phys., 1964, 42, p. 678-683.
- Mair W. A.-Philos. Mag., 1952, 43, p. 695-716.
- Merzkirch W. Flow Visualization, 1974.-New York: Academic Press.
- Mueller T. J., Nelson R. C., Kegelman J. T., Morkovin M. V.-AIAA J., 1981, 19, p. 1607-1608. [Имеется перевод: Ракетная техника и космонавт., 1981.]
- Newman J. N. Eighth Symposium on Naval Hydrodynamics, M. S. Plesset, T. Y. Wu, S. W. Doroff, eds., 1970,

- p. 519-545. Washington: U. S. Govt. Printing Office.
- Oertel H., Jr. In: Flow Visualization II. W. Merzkirch, ed., p. 71-76. 1982a.-Washington: Hemisphere.
- Oertel H., Jr. In: Thermal Instabilities in Convective Transport and Instability Phenomena, J. Zierep, H. Oertel, eds., 1982b. Karlsruhe: Braun
- Oertel H., Jr., Kirshartz K. R. Recent Developments in Theoretical and Experimental Fluid Mechanics. U. Müller, K. G. Roosen, B. Schmidt, eds., 1979, p. 355-366. Berlin: Springer-Verlag.
- Oertel H., Sr. Stossrohre. 1966. Vienna: Springer-Verlag
- Oertel H., Sr. Modern Developments in Shock Tube Research. 1975, p. 488-495 (Shock Tube Research Soc. Japan).
- Payard M., Coutanceau M. C. R. Acad. Sci., Ser. B. 1974, **278**, p. 369-372.
- Pera L., Gebhart B. Int. J. Heat Mass Transfer. 1971, **14**, p. 975-984.
- Pera L., Gebhart B. Int. J. Heat Mass Transfer. 1972, **15**, p. 175-177.
- Pera L., Gebhart B. J. Fluid Mech., 1975, **68**, p. 259-271.
- Perry A. E., Lim T. T. J. Fluid Mech., 1978, **88**, p. 451-463.
- Perry A. E., Lim T. T., Teh. F. W. J. Fluid Mech., 1981, **104**, p. 387-405.
- Pierce D.-J. Fluid Mech., 1961, **11**, p. 460-464.
- Polymeropoulos C. E., Gebhart B. J. Fluid Mech., 1967, **30**, p. 225-239.
- Präse H.-G.-Rept. no. E 10/77, 1977.-Ernst-Mach-Institut, Freiburg.
- Pullin D. I., Perry A. E. J. Fluid Mech., 1980, **97**, p. 239-255.
- Roshko A. AIAA J., 1976, **14**, p. 1349-1357. [Имеется перевод: "Ракетная техника и космонавт.", 1976.]
- Rutland D. F., Jameson G. J. Chem. Eng. Sci., 1970, **25**, p. 1301-1317.
- Rutland D. F., Jameson G. J. J. Fluid Mech., 1971, **46**, p. 267-271.
- Sarpkaya T. J. Fluid Mech., 1971, **45**, p. 545-559.
- Sawatzki O., Zierep J. Acta Mech., 1970, **9**, p. 13-35.
- Schardin H. Proc. VII Int. Cong. High Speed Photog., 1965, p. 113-109. Darmstadt: Verlag O. Helwich.
- Schooley A. H. J. Mar. Res., 1958, **16**, p. 100-108.
- Sedney R., Kistchens C., Jr., 1975. AGARD Conf. Proc. no. 168, 1975, paper 37.
- Shlien D. J., Boxman R. L. Int. J. Heat Mass Transfer, 1981, **24**, p. 919-931.
- Simpkins P. G. Nature (London) Phys. Sci., 1971, **233**, p. 31-33.
- Sparrow E. M., Husar R. B., Goldstein R. J.-J. Fluid Mech., 1970, **41**, p. 793-800.
- Sturtevant B., Kulkarny V. A. J. Fluid Mech., 1976, **73**, p. 651-671.
- Taneda S. Rep. Res. Inst. Appl. Mech. Kyushu Univ., 1955, **4**, p. 29-40.
- Taneda S. J. Phys. Soc. Japan, 1956a, **11**, p. 302-307.
- Taneda S. J. Phys. Soc. Japan, 1956b, **11**, p. 1104-1108.
- Taneda S. Rep. Res. Inst. Appl. Mech. Kyushu Univ., 1968, **16**, p. 155-163.
- Taneda A. Prog. Aerosp. Sci., 1977, **17**, p. 287-348.
- Taneda S.-J. Phys. Soc. Japan, 1979, **46**, p. 1935-1942.
- Taneda S., Honji H.-J. Phys. Soc. Japan, 1971, **30**, p. 262-272.
- Taylor G. I.-In: The NCFMF Book of Film Notes, 1972, p. 47-54. The MIT Press with Education Development Center, Inc., Newton, Mass.
- Thorpe S. A. J. Fluid Mech., 1971, **46**, p. 299-319.
- Wallet A., Ruellan F. Houille Blanche, 1950, **5**, p. 483-489.
- Wegener P. P., Parlange J.-Y. Ann. Rev. Fluid Mech., 1973, **5**, p. 79-100.
- Wegener P. P., Sundell R. E., Parlange J.-Y. Z. Flugwiss., 1971, **19**, p. 347-352.
- Werlé H.-Rech. Aéronaut., 1960a, no. 74, p. 23-30.
- Werlé H. Rech. Aéronaut., 1960b, no. 79, p. 9-26.
- Werlé H. Rech. Aéronaut., 1962, no. 90, p. 3-14.
- Werlé H. Houille Blanche, 1963, **18**, p. 587-595.
- Werlé H.-Ann. Rev. Fluid Mech., 1973, **5**, p. 361-382.
- Werlé H.-Le Tunnel Hydrodynamique au Service de la Recherche Aéropatiale, 1974, Publ. no. 156.-ONERA: France.
- Werlé H.-Rech. Aérop., 1980, **5**, p. 35-49.
- Werlé H., Gallon M.-Aéronaut. and Astronaut., 1972, no. 34, p. 21-33.
- Werlé H., Gallon M. Houille Blanche, 1973, **28**, p. 339-360.
- Westley R., Lindberg G. M., Chan Y. Y., Lee B. H. K.-DME/NAE Quart. Bull. 1972(1), National Research Council, Canada.
- Wijngaarden L. van, Vossers G. J. Fluid Mech., 1978, **87**, p. 695-704.
- Wortmann F. X. AGARD Conf. Proc. no. 224, paper 12, 1977.
- Yamada H., Matsui T. Phys. Fluids, 1978, **21**, p. 292-294.
- Zdravkovich M. M. J. Fluid Mech., 1969, **37**, p. 491-496.

Литература по гидродинамике,

ВЫПУЩЕННАЯ ИЗДАТЕЛЬСТВОМ «МИР»¹

- 1948
Карман Т. Сверхзвуковая аэродинамика. Принципы и приложения. Пер. с англ.—М.: ИЛ, 1948.
- 1949
Липман Г., Пакет А. Введение в аэродинамику сжимаемой жидкости. Пер. с англ.—М.: ИЛ, 1949.
- 1950
Газовая динамика: Сб. статей. Пер. с англ.—М.: ИЛ, 1950.
- 1951
Прандтль Л. Гидроаэромеханика. Пер. с нем.—М.: ИЛ, 1951.
- 1954
Берс Л. Математические вопросы дозвуковой и околосзвуковой газовой динамики. Пер. с англ.—М.: ИЛ, 1954.
Биркгоф Г. Гидродинамика. Постановки задач, результаты и подобие. Пер. с англ.—М.: ИЛ, 1954.
Гошек И. Аэродинамика больших скоростей. Пер. с чешск.—М.: ИЛ, 1954.
Зауер Р. Течения сжимаемой жидкости. Пер. с франц.—М.: ИЛ, 1954.
- 1955
Бэтчелор Дж. Теория однородной турбулентности. Пер. с англ.—М.: ИЛ, 1955.
Пэнкхёрст Р., Холдер Д. Техника эксперимента в аэродинамических трубах. Пер. с англ.—М.: ИЛ, 1955.
- 1956
Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. Пер. с нем.—М.: ИЛ, 1956.
- 1958
Линь Цзя-цзяо. Теория гидродинамической устойчивости. Пер. с англ.—М.: ИЛ, 1958.
- 1959
Каулинг Т. Магнитная гидродинамика. Пер. с англ.—М.: ИЛ, 1959.
Стокер Дж. Волны на воде. Математическая теория и приложения. Пер. с англ.—М.: ИЛ, 1959.
Таунсенд А. Структура турбулентного потока с поперечным сдвигом. Пер. с англ.—М.: ИЛ, 1959.
- 1960
Гудерлей К. Теория околосзвуковых течений. Пер. с нем.—М.: ИЛ, 1960.
Липман Г., Рошко А. Элементы газовой динамики. Пер. с англ.—М.: ИЛ, 1960.
- 1961
Бай Ши-и. Введение в теорию течения сжимаемой жидкости. Пер. с англ.—М.: ИЛ, 1961.
Мизес Р. Математическая теория течений сжимаемой жидкости. Пер. с англ.—М.: ИЛ, 1961.
- 1962
Фридендер Ф. Звуковые импульсы. Пер. с англ.—М.: ИЛ, 1962.
Хейз У., Пробстин Р. Теория гиперзвуковых течений. Пер. с англ.—М.: ИЛ, 1962.
Шлихтинг Г. Возникновение турбулентности. Пер. с нем.—М.: ИЛ, 1962.
- 1963
Гаррис Л. Магнито-гидродинамические течения в каналах. Пер. с англ.—М.: ИЛ, 1963.
Линь Цзя-цзяо. Турбулентные течения и теплопередача. Пер. с англ.—М.: ИЛ, 1963.
Серрин Дж. Математические основы классической механики. Пер. с англ.—М.: ИЛ, 1963.
Эммонс Г. Основы газовой динамики. Пер. с англ.—М.: ИЛ, 1963.

¹ Настоящий список литературы приводится для удобства читателя и содержит книги, выпущенные издательством «Мир» (которое до 1964 г. называлось издательством ИЛ). В этих книгах читатель найдет дополнительную информацию по вопросам, связанным с данной тематикой.—Прим. ред.

1964

Бай Ши-и. Магнитная газодинамика и динамика плазмы. Пер. с англ.-М.: Мир, 1964.
Биркгоф Г., Сарантонелло Э. Струи, следы и каверны. Пер. с англ.-М.: Мир, 1964.

Гидродинамическая неустойчивость. Пер. с англ.-М.: Мир, 1964.

Милн-Томсон Л. Теоретическая гидродинамика. Пер. с англ.-М.: Мир, 1964.

1965

Гиро Ж. Основные вопросы теории гиперзвуковых течений. Пер. с англ.-М.: Мир, 1965.

Жермен П. Механика сплошных сред. Пер. с франц.-М.: Мир, 1965.

Ричардсон Э. Динамика реальных жидкостей. Пер. с нем.-М.: Мир, 1965.

1966

Дорренс У. Гиперзвуковые течения вязкого газа. Пер. с англ.-М.: Мир, 1966.

1967

Ван-Дайк М. Методы возмущений в механике жидкости. Пер. с англ.-М.: Мир, 1967.

Хант Д. Динамика несжимаемой жидкости. Пер. с англ.-М.: Мир, 1967.

Шерклиф Дж. Курс магнитной гидродинамики. Пер. с англ.-М.: Мир, 1967.

1968

Конт-Белло Ж. Турбулентное течение в канале с параллельными стенками. Пер. с франц.-М.: Мир, 1968.

1970

Нелинейная теория распространения волн. Пер. с англ.-М.: Мир, 1970.

1971

Гидродинамика кровообращения: Сб. статей. Пер. с англ.-М.: Мир, 1971.

1972

Коул Дж. Методы возмущений в прикладной математике. Пер. с англ.-М.: Мир, 1972.

1973

Бэтчелор Дж. Введение в динамику жидкости. Пер. с англ.-М.: Мир, 1973.

1977

Уизем Дж. Линейные и нелинейные волны. Пер. с англ.-М.: Мир, 1977.

1979

Вихревые движения жидкости: Сб. статей 1975-1977. Пер. с англ.-М.: Мир, 1979.

1980

Биогидродинамика плавания и полета: Сб. статей 1977. Пер. с англ.-М.: Мир, 1980. (Механика. Новое в зарубежной науке.)

Гидродинамическое взаимодействие частиц в сусециях: Сб. статей. Пер. с англ.-М.: Мир, 1980. (Механика. Новое в зарубежной науке.)

Роуч П. Вычислительная гидродинамика. Пер. с англ.-М.: Мир, 1980.

1981

Бёрд Г. Молекулярная газовая динамика. Пер. с англ.-М.: Мир, 1981.

Бранков Г. Основы биомеханики. Пер. с болг.-М.: Мир, 1981.

Джозеф Д. Устойчивость движений жидкости. Пер. с англ.-М.: Мир, 1981.

Лайтхилл М. Дж. Волны в жидкостях. Пер. с англ.-М.: Мир, 1981.

Темам Р. Уравнения Навье-Стокса: Теория и численный анализ. Пер. с англ.-М.: Мир, 1981.

1983

Бхатнагар П. Нелинейные волны в одномерных системах. Пер. с англ.-М.: Мир, 1983.

Педли Т. Гидродинамика крупных кровеносных сосудов. Пер. с англ.-М.: Мир, 1983.

1985

Вихри и волны: Сб. статей 1977-1983. Пер. с англ.-М.: Мир, 1985. (Механика. Новое в зарубежной науке.)

Трехмерные турбулентные пограничные слои. Пер. с англ. Под ред. Х. Фернхольца. Е. Краузе. М.: Мир, 1985.

1986

Гилл А. Динамика атмосферы и океана. В 2-х томах. Пер. с англ.-М.: Мир, 1986.

Ейтс Дж. Основы механики псевдожидкости с приложениями. Пер. с англ.-М.: Мир, 1986. (Механика. Новое в зарубежной науке.)

Успехи прикладной механики: Сб. статей 1983-1984. Пер. с англ.-М.: Мир, 1986.

Предметный указатель

- Цифры, набранные прямым шрифтом, соответствуют номерам фото; цифры, набранные курсивом, — номерам страниц
- Бейсбольный мяч** 66
Блазуса пограничный слой 29
 профиль 30
 цилиндр, нормальный ему 92, 93
Бора 199, 200
- Винт** 75
Вихревая дорожка
 за круговым цилиндром 4, 94–98, 221
 за телом под углом атаки 88, 89
Вихревая пелена
 за внезапно приведенным в движение клином 80
 за внезапно приведенной в движение пластинкой 63
 за прямоугольным крылом 84–86 при истечении из сопла 76
Вихревое кольцо
 в круглой струе 102, 117–120
 за шаром 49–54
 образующееся на цилиндре, внезапно приведенном во вращение 121
 образующиеся у отверстия в пластинке 271
 структура 77
 формирование 76
чехарда двух колец 79
 ядро 78
Вихрь разрушение 124–126
Вихри 75–101
 внутри клина 10
 в пограничном слое 99, 100
 в ползущем течении 10–20
 вторичные 61, 76, 92, 93
 за вращающимся винтом 75
 за круговым цилиндром 40–46, 94–98
 за плоской пластинкой 64, 65 за телом вращения под углом атаки 87–89
 над треугольным крылом под углом атаки 90, 91
 перед цилиндром в пограничном слое 92, 93, 165
 развитие на ускоренно движущейся пластинке 81
 сбегающие с крыла 84–86, 255
 спаривание их 178
 спиральные 132, 135
 Тейлора 127–129, 131
- Вихрь**
 в сливе ванны 101
 образующийся в начале движения 80, 81
Внезапное начало движения
 кругового цилиндра 59, 61
 плоской пластинки 63–65
 решетки цилиндров 60
Водяная струя 178–181
Волны
 бегущие 191
 за кораблем 201
 инерционные, на вихре в сливе ванны 101
 капиллярные 196, 197
 на вихревом кольце 114
 поверхностные, на воде 191–197, 199–201
 разрушение 192, 194
 стоячие 191
Вторичное присоединение пограничного слоя 33, 35, 36
Вторичные вихри 61, 76, 92, 93
Выступ
 обтекаемый ползущим течением 11
 – в течении в лотке *Хил-Шоу* 5
 – с турбулентным отрывом 39
- Гидравлическая аналогия** 229
- Диск, вращающийся** 132
Дифракция ударной волны 239
Диффузор, отрывное течение в чьем 175
Дозвуковое течение, 219–224
Дуга полукруга в ползущем течении 13
Дымовое кольцо — см. **Вихревое кольцо**
- Захват жидкости струей** 169–171
- Изотропная турбулентность** 154, 155
- Каверна**, обтекание ползущим потоком 14
Кавитация
 в сопле 190
 пузырь у свободной поверхности 187
Капиллярная неустойчивость жидкой струи 122, 123
Капиллярные волны 196, 197
Кармана вихревая дорожка за круговым цилиндром 4, 94–98, 221
 за телом под углом атаки 88, 89
Клин
 внезапное начало движения 80, 82
 дифракция ударной волны около него 240, 241
 отражение ударной волны от него 235–238
 ползущее течение внутри его 10
 сверхзвуковое обтекание 228, 231, 233, 234, 256
Когерентные структуры в слое смешения 176–178
Колесблюющийся цилиндр 31
Конвективный факел 205, 215–218
Конвекция
 между цилиндрами 208, 209
 от вертикальной пластинки 204, 205, 213, 214
 от кругового цилиндра 202, 206, 211
 от нагретой горизонтальной проволоки 203
 под горизонтальной пластинкой 210
Конус
 вращающийся 134
 в сверхзвуковом потоке 257–259, 261, 274
 под углом атаки 73
Концевые вихри, сбегающие с крыла 84–86, 255
 неустойчивость 116
Корабельные волны 201
Косая ударная волна

- образование 227
 при обтекании клина 228, 231, 233
 Круговая неустойчивость 116
 Круговое отверстие, сверхзвуковое течение через него 277
 Круговой цилиндр
 вблизи пластинки 17
 вихревая дорожка *Кармана* за ним 94, 98, 221, 4
 вихри *Тейлора* между такими цилиндрами 127, 128, 131
 вращающийся приводимый во вращение 121
 в отрывном ламинарном потоке 40, 46
 в ползущем течении 6
 в течи в лотке *Хил-Шоу* 1 колеблющийся 31
 нормальная граница пограничного слоя 92, 93, 165
 решетка цилиндров, внезапно начинающийся движение 59, 62
 обтекаемый ламинарным потоком 24
 - при большом числе Рейнольдса 47, 48
 обтекание пары таких цилиндров в tandem 15
 - расположенных рядом 16
 при внезапно начале движения 61, 62
 спиральная турбулентность между такими цилиндрами 130
 Круговые вихри 84, 86, 90, 91, 255
- Ламинарное течение 21-74
- Маховское отражение
 нерегулярное 238
 обыкновенное 236, 237
- Неустойчивость 102, 150
 Бенара 141
 вихревого кольца 112-115
 вихрей над треугольным крылом 125, 126
 водяной струи 179-181
 закрученного течения в трубе 124
 капель в потоке 148
 капиллярная, жидкой струи 122, 123
 Кельвина Гельмгольца 145-147
 круглой струи 102, 117-120
 кругового течения *Кутты* 127, 128, 130, 131
 пары концевых вихрей 116
 пограничного слоя на пластинке 104, 106, 109, 111
 на цилиндре, внезапно приводимом во вращение 121
 под воздействием плавучести 139, 140
 при наложении потоков 146
 Рэлея Бенара 139
 свободной конвекции 214, 215
 стратифицированной сдвигового течения 145
 струйки дыма от сигареты 107
 течения между вращающимися
- сферами 129
 на вогнутой стенке 144
 на вращающемся теле 132-135, 150
Томпсона 103
Толлмина-Шлихтинга 144
 тонкой жирной пелены 147, 149
- Обрушивание волны на воде 192, 194
 Отсеивающая головная ударная волна 7, 234, 254, 256, 258, 262-273
 Отрыв 32-74
 в диффузоре 175
 ламинарные 24, 27, 69, 71
 на конусе под углом атаки 73
 на круговом цилиндре 15, 17, 40-48, 59, 62, 221, 222
 на крыловом профиле под углом атаки 72
 на оживальном теле *Рикмана* 74
 на шаре 19, 20, 49, 58, 66, 220, 266
 на эллипсе 32
 перед ступенькой 69
 при малых числах Рейнольдса 10, 20
 у передней кромки 33, 35, 36
- Переход к турбулентности
 в вихревом кольце 111
 винт по потоку от волн *Толлмина Шлихтинга* 106
 в пограничном слое на шаре 55, 57, 58
 в трубе 103
 за тель вращения 70, 71
 за пластинке 104, 105
- Пластинка
 в ламинарном потоке 29, 30
 внезапно начинающая движение 63-65
 в ползущем течении 7
 в течи в лотке *Хил-Шоу* 3
 ламинарный отрыв на ней 35-37
 неустойчивость пограничного слоя на ней 104-106
 турбулентное пятно при обтекании 109-111
 ускоренно движущаяся 81
- Поверхностные волны 191-197, 199-201
- Пограничный слой
 ламинарный и турбулентный 156
 на плоской пластинке 29, 30
 турбулентный 156, 165
 цилиндр, нормальный к нему 92, 93, 165
- Подковообразные вихри
 перед цилиндром в пограничном слое 92
 при отсосе через отверстия в пограничном слое 99, 100
- Подслон турбулентного пограничного слоя 159, 160
- Ползущее течение 1-20
- Потенциальное течение 1-5
- Профиль крыла
 в дозвуковом потоке 219
 в ламинарном потоке 23
 в сверхзвуковом потоке с заграждением 230
- в течи в лотке *Хил-Шоу* 4
 под углом атаки, при наличии отрыва 34, 72
 с заглушенной задней кромкой 67, 68
- Прямая ударная волна 225
 образование 226
 Прямоугольное крыло 84-86
- Пузырь в течи, неустойчивость 103
 Пузырь
 коллаген 188
 поднимающийся в жидкостях 182, 186
 при кавитации 187
 Пуля 7, 254
- Рейнольдса* эксперимент с краской 103
 Релаксационное расширение фронта ударной волны 233
- Решетка круговых цилиндров
 импульсивное обтекание 60
 свободная конвекция от нее 211
- Решетка, турбулизация с ее помощью 152, 155
- Рикмана* оживальное тело 22, 74
Рикмана полутело 2
- Свертывание вихревой пелены 80, 86
 Сверхзвуковое течение 252-279
 в струе 168
 при обтекании клина 228, 231, 233, 234, 256
 при обтекании конуса 257, 259, 261, 274
 при обтекании модели самолета 255
 при обтекании пули 7, 254
 при обтекании сферяда 253
 при обтекании тела со степенным контуром 273
 при обтекании тела с плоской передней частью 262, 265, 282
- Свободная конвекция 202-218
 - поверхность, течение с ней 179, 201
- След
 за кораблем 201
 за круговым цилиндром 59, 62, 94, 98, 221, 222, 4
 за профилем с плоской задней кромкой 67, 68
 за танкером, севшим на мель 172
 за телом вращения с плоским лбом 71, 223, 224, 253, 265
 за тонким телом 21
 за шаром 49, 58, 266, 269, 271
 пузыря 184, 186
 турбулентный 151, 172, 174
- Слив ванны (вихрь в нем) 101
- Смешения слоев 176, 178
- Сопло
 кавитация в нем 190
 процесс запуска для него 278
 распыление при истечении из него 198
 сверхзвуковое, при наличии возмущений от стенок 279
- Спаривание вихрей 178
- Спиральные вихри 132, 135
- Стокса* течение 1-20

Струя
водяная 179–181
капиллярная неустойчивость 122
неустойчивость 102, 117–120
сверхзвуковая 275, 276
турбулентная 166–171
Ступенька, обтекание 69, 70

Тейлора вихри 127–129, 131

Тело вращения
в дозвуковом потоке 223, 224
вихри за ним (тело под углом атаки) 87, 88, 89
в ламинарном потоке с отрывом 33
в сверхзвуковом потоке 253, 260, 261
ламинарный след за ним 21

Термики, порождаемые нагретой поверхностью 108

Толлмина–Шлихтинга волны 106, 135
Транзвуковое «замораживание» 253
Транзвуковое течение 219–224, 250, 253–255

Треугольное крыло
вихри над ним 90, 91
разрушение вихрей над ним 125, 126

Турбулентное пятно 109–111
Турбулентное течение 151–178
в пограничном слое 156–165

в следе 151
в слое смешения 176–188
в струе 166–171, 275, 276
в трубе 103
за круговым цилиндром 47, 48, 221, 222
за прямоугольным выступом 39
за решеткой 152–155
за телом вращения 70, 71, 223, 224, 253, 254, 261
за шаром 55–58, 220, 266, 269
на искривленной стенке 38

Ударные волны 225–251
взаимодействие с пограничным слоем 248–251
дифракция 239–242
на клине 228, 229, 231, 234, 256
на конусе 257–259, 261, 274
на поверхности снаряда при дозвуковой скорости 223, 224
на профиле с плоской задней кромкой 67
на теле вращения под углом атаки 89
образование 226, 227
отошедшие 234, 254, 256, 258, 262–273
попадающие на клин 82, 83
прямые 225, 226
фокусировка 244

Уднелла неустойчивость 113

Факел конвективный 203, 215–218
Фокусировка ударной волны 244

Хил–Шоу течение 1–5

Чехарда вихревых колец 79

Шар

в дозвуковом потоке 220
вихри Тейлора 129
в ламинарном потоке 26–28
в ламинарном потоке с отрывом 49–54
вращающийся 133
в сверхзвуковом потоке 266–271
движущийся в трубе 8, 9, 28, 51
обтекание при большом числе Рейнольдса 55–58

Эллипс, ламинарный отрыв на нем 32
Эммонса турбулентное пятно 109, 110, 111

*AN ALBUM
OF FLUID MOTION*

Assembled
by *MILTON VAN DYKE*

Department of Mechanical Engineering
Stanford University, Stanford, California

THE PARABOLIC PRESS
STANFORD, CALIFORNIA, 1982

АЛЬБОМ ТЕЧЕНИЙ ЖИДКОСТИ И ГАЗА

СОСТАВЛЕНИЕ И АВТОРСКИЙ ТЕКСТ

М. ВАН-ДАЙКА

Перевод с английского

Л. В. Соколовской

под редакцией

Г. И. Баренблатта
и В. П. Шидловского



МОСКВА «МИР» 1986