

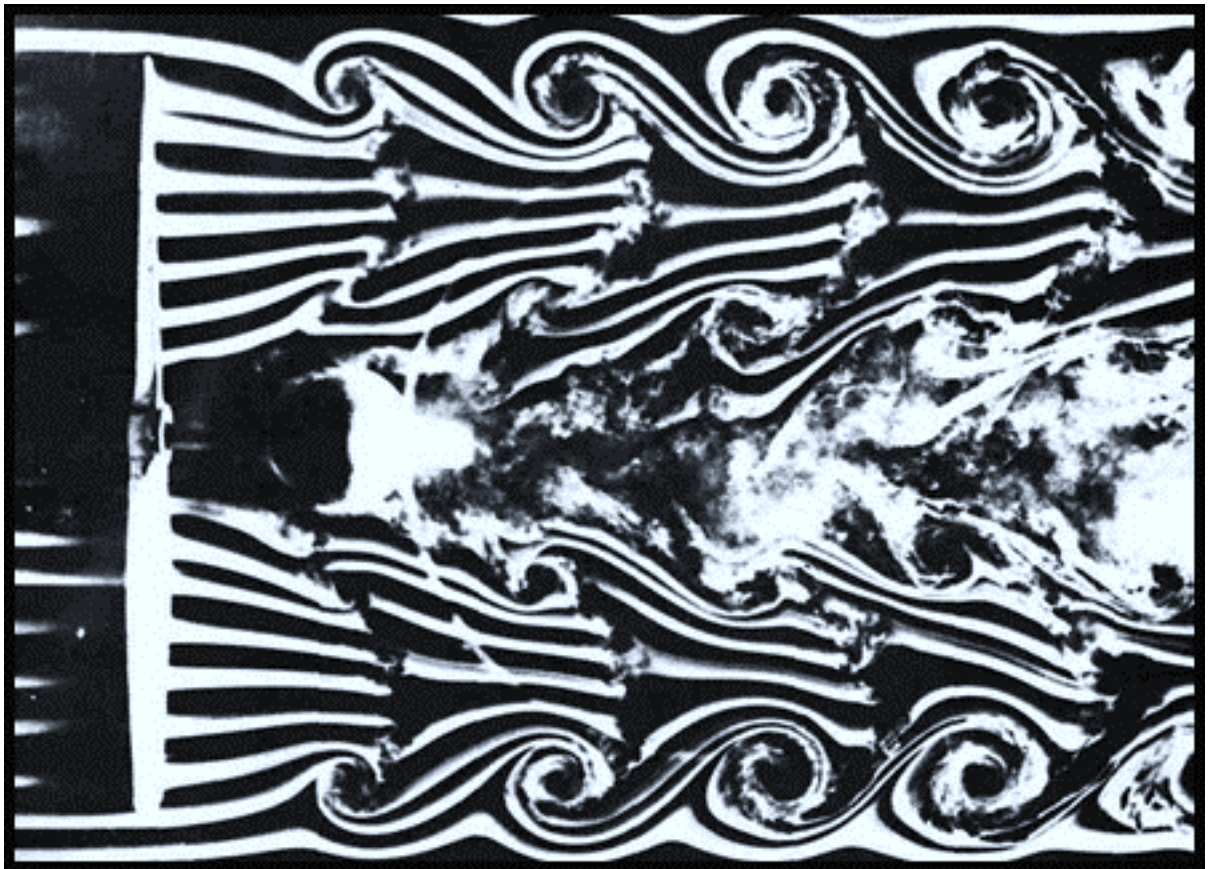
**АЛЬБОМ ТЕЧЕНИЙ ЖИДКОСТИ И ГАЗА**



**Вихри**

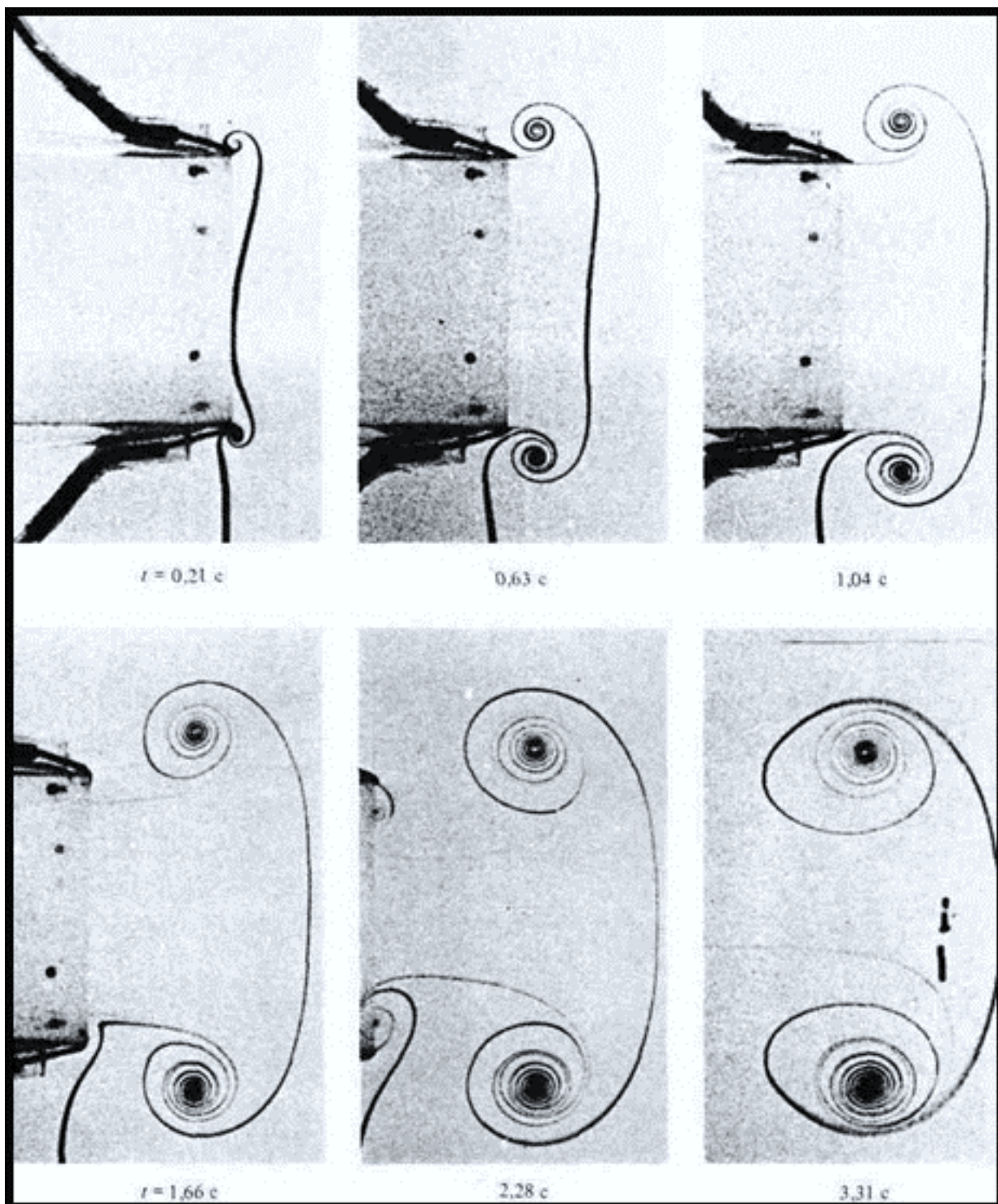
### 1. Вихри за вращающимся винтом

Впечатляющая картина винтовых концевых и корневых вихрей визуализирована дымом в аэродинамической трубе Университета Нотр-Дам. Поток движется со скоростью 48 фут/с, винт вращается со скоростью 4080 об/мин. [Brown, 1971], любезно предоставлено Т. Дж. Мюллером (T. J. Mueller).



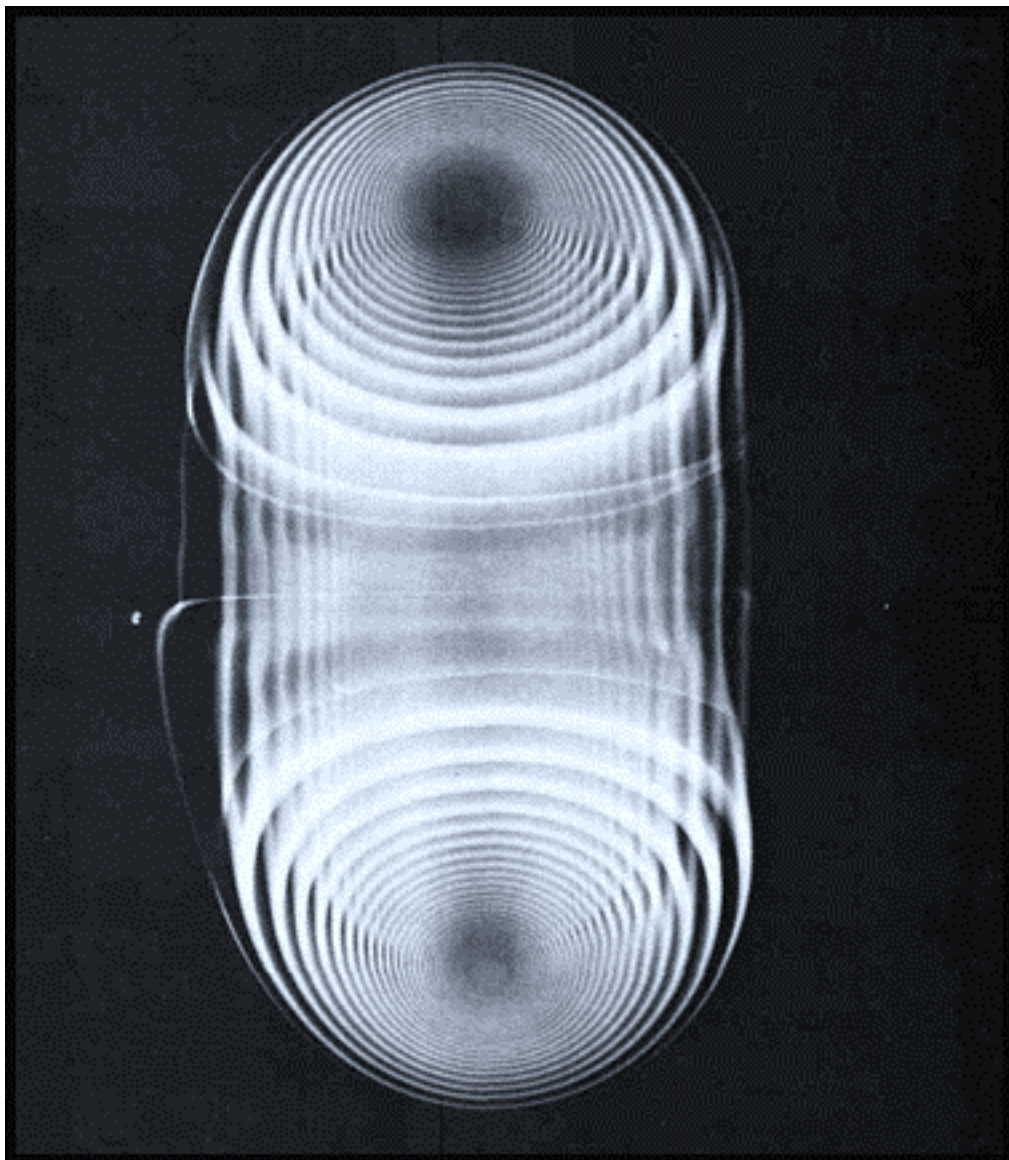
## 2. Формирование вихревого кольца при истечении из сопла

Вода вытекает из кругового сопла диаметром 5 см с острыми кромками в бассейн, также заполненный водой. Истечение воды происходит под действием поршня, движущегося с постоянной скоростью 4,6 см/с после ускорения в течение 0,3 с. Краска, введенная на кромке сопла, показывает процесс свертывания вихревой пелены, отрывающейся от этой кромки. Через 1,6 с поршень останавливается, после чего вихревое кольцо индуцирует вторичный вихрь с циркуляцией противоположного знака. [Didden, 1979]



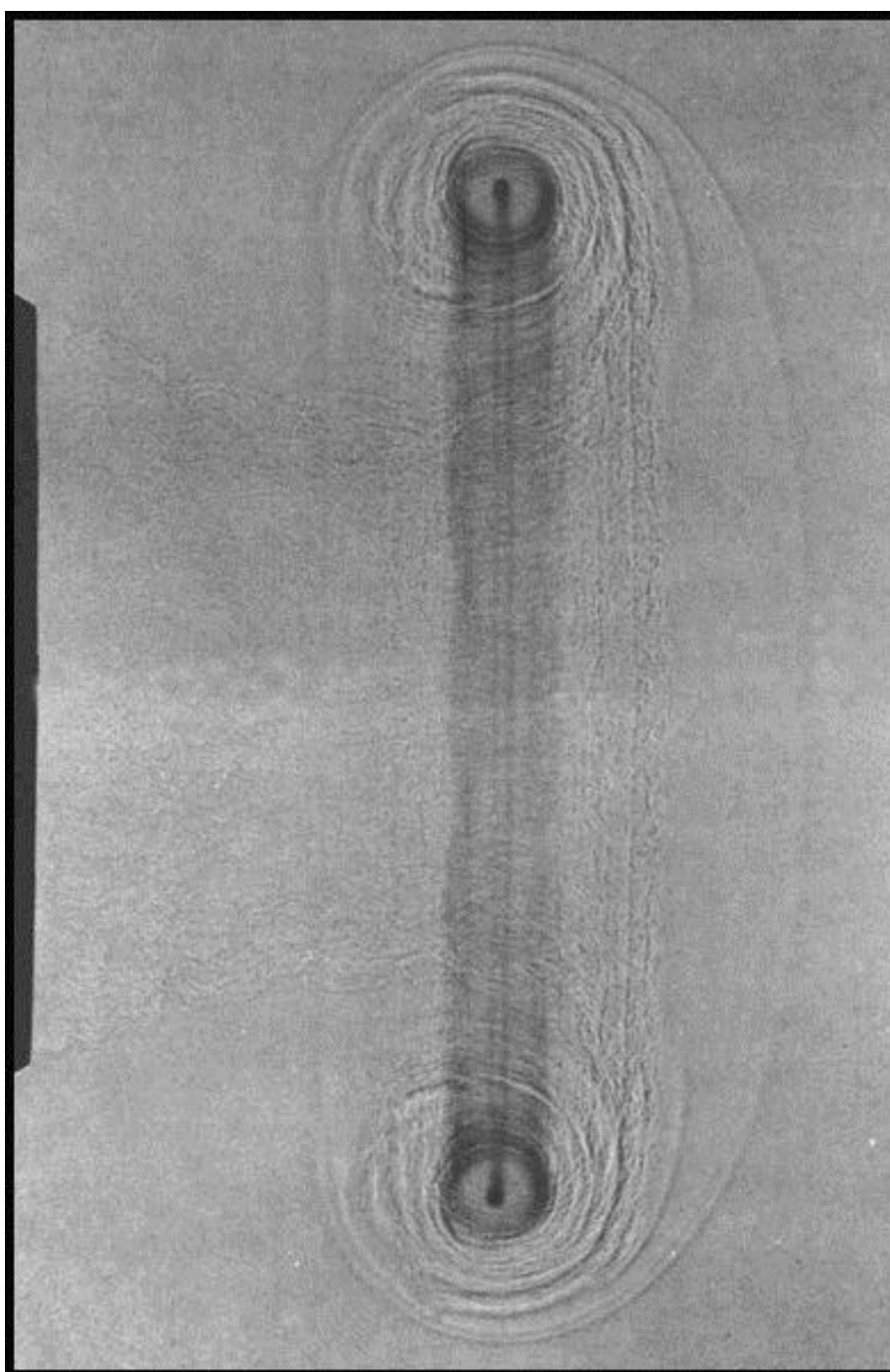
### 3. Структура дымового кольца

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 туго свернутая тороидальная спираль. Число Рейнольдса примерно равно 10000. [Magarvey, MacLachy, 1964]



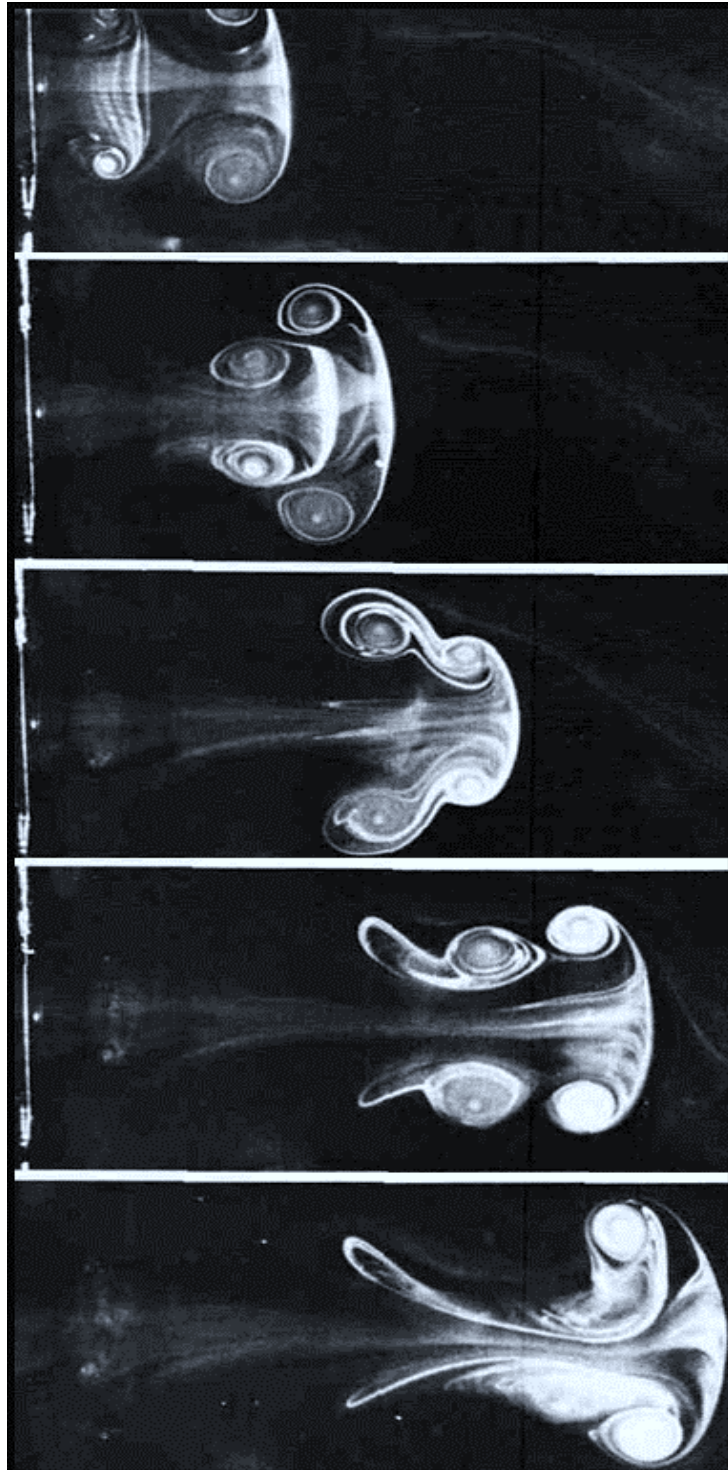
#### 4. Ядро вихревого кольца

Кольцо создано путем дифракции импульса давления, выброшенного из трубы в воздух. Волны уже затухли, оставив вихревое кольцо, движущееся в направлении от устья трубы. Затемнённые участки ядра видны на этой сделанной искровым методом теневой фотографии благодаря естественным образом возникающему во вращательном движении понижению плотности. Кроме того, с целью облегчения визуализации наружных частей кольца труба была предварительно охлаждена. Сфотографирована только верхняя половина, поэтому чтобы получить целое изображение кольца, полученная картина была отражена от оси. Фото Bradford Sturtevant.



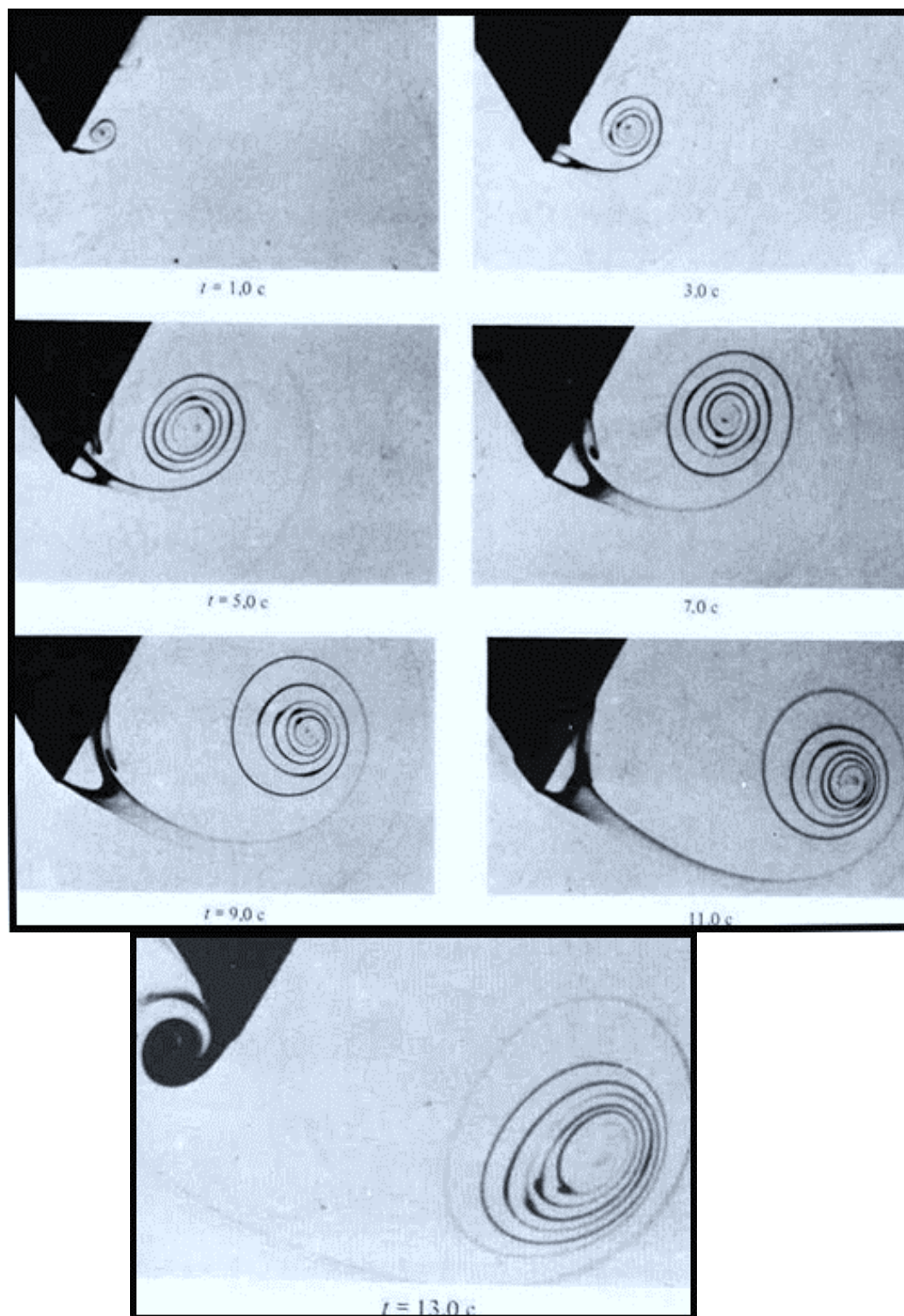
## 5. Чехарда двух вихревых колец

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]



### 6. Вихрь на клине, образующийся при начале движения

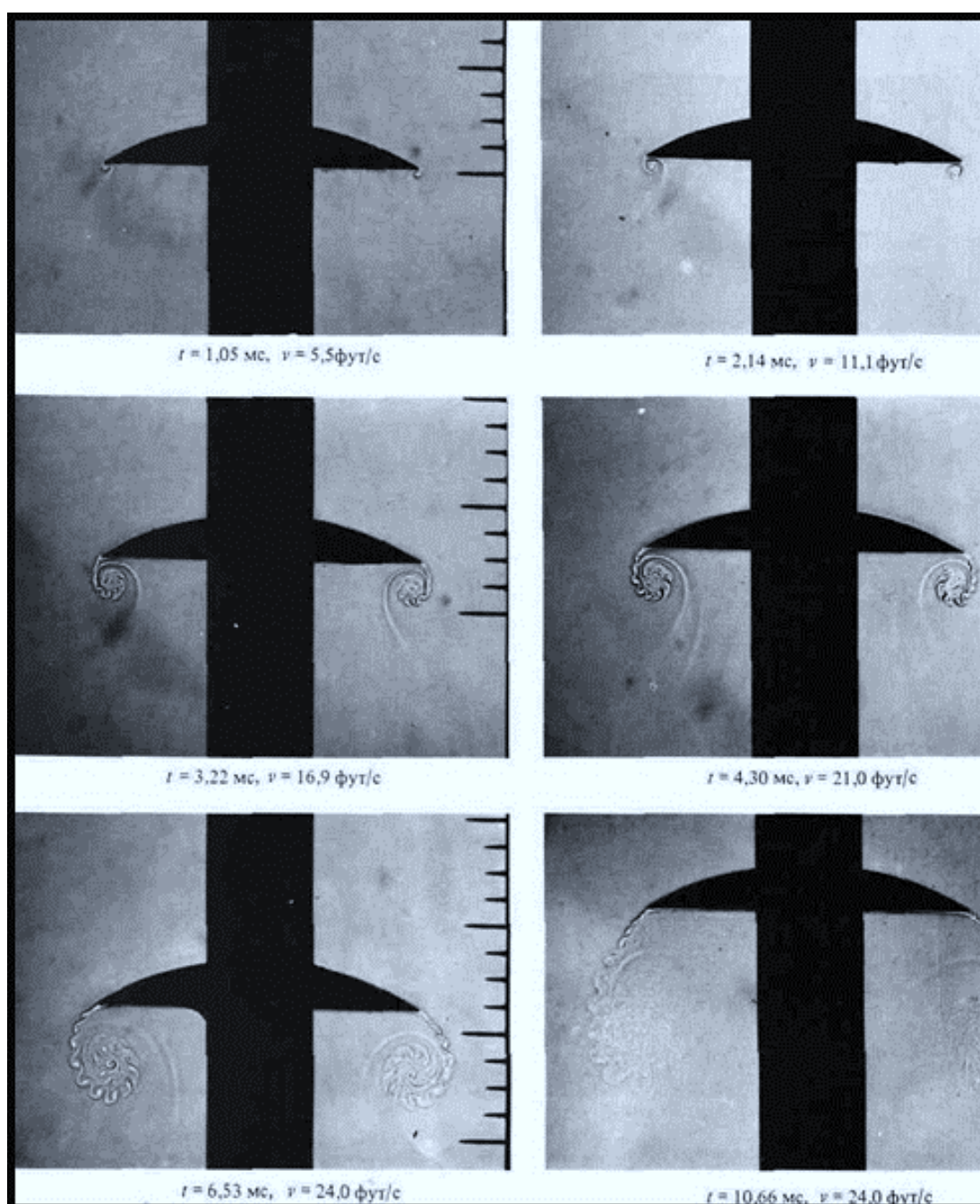
Поршень выталкивает воду с почти постоянной скоростью в направлении нормали к оси клина с полууглом раствора  $30^\circ$ . Краска, обладающая нейтральной плавучестью, впрыскивается в воду через малые отверстия на поверхности клина. Характерное число Рейнольдса имеет порядок 1000. Через 12,5 с поршень останавливается, создавая второй, остановочный, вихрь, видимый на последнем снимке. [Pullin, Perry, 1980]



## 7. 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. Пластика 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]





### 8. Вихрь от клина в ударной трубе

Эта шлирен-фотография демонстрирует вихрь, сбегаящий спиралью с вершины тонкого клина после того, как воздух приводится в движение по нормали к срединной плоскости клина слабой плоской 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 её размер растёт пропорционально времени. Фото Walker Bleakney.



### 9. Распределение плотности в вихре от клина

Совершенно иная картина того же явления, что и на фото 18, получается на приводимой здесь интерферограмме в полосах бесконечной ширины, показывающей линии постоянной плотности. Поразительной особенностью снимка является почти идеальное круговое распределение плотности относительно центра вихря, продолжающееся практически до самого клина. Фото Walker Bleakney.



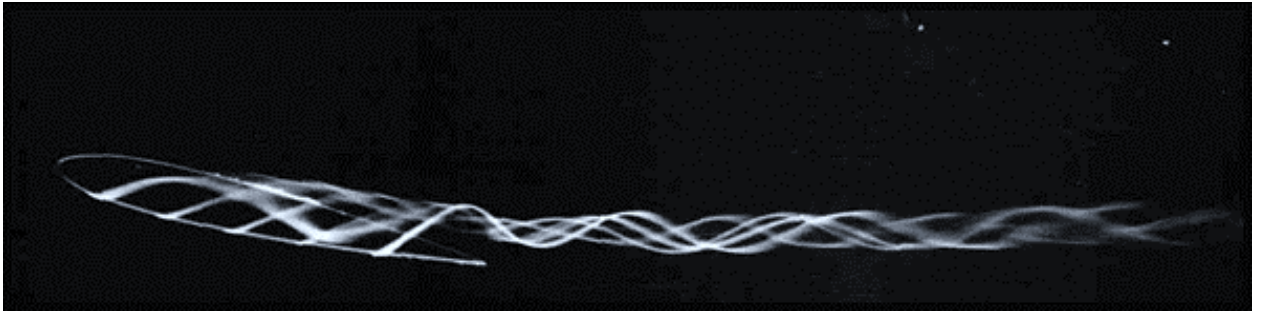
## 10. Сечения вихревой пелены за прямоугольным крылом

След, сворачивающийся за прямоугольным крылом под углом атаки  $9^\circ$ , 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 проволочки 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 100000. Вихревая пелена первоначально турбулентна, но дальше вниз по потоку вновь становится ламинарной. Фото Н. Виппес.



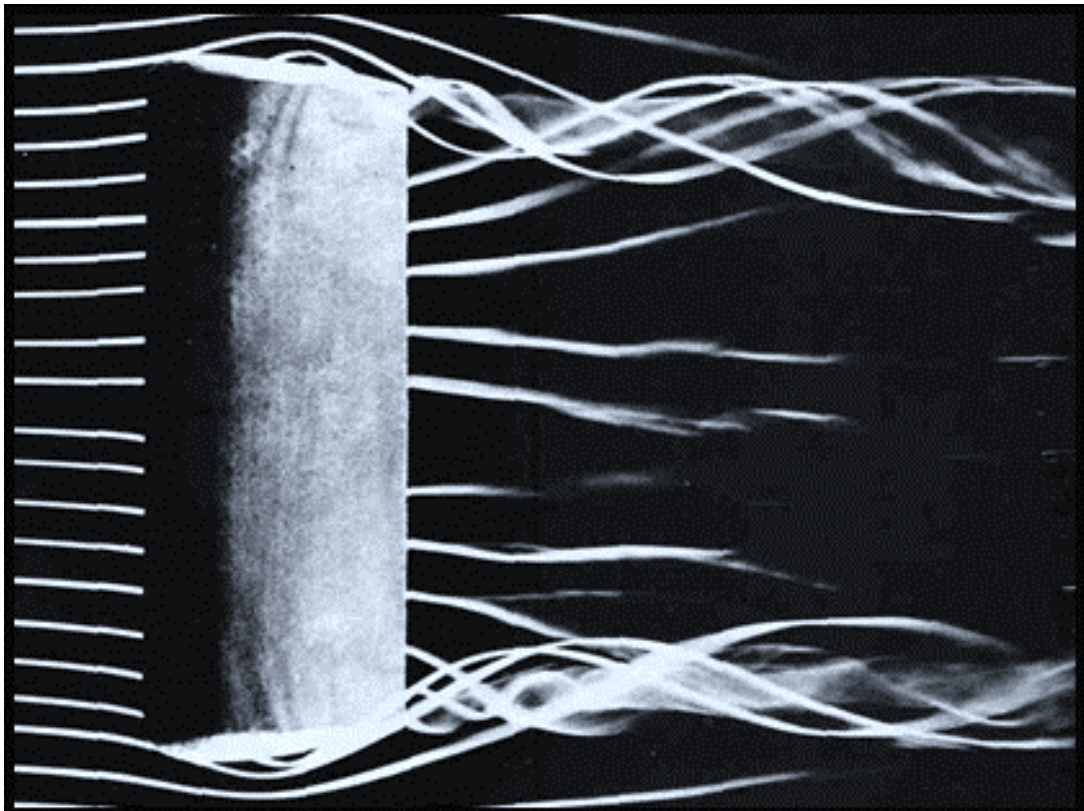
### 11. Концевой вихрь от торца прямоугольного крыла

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 Рейнольдса, равном 10000, след ламинарен в отличие от течения на фото 10. Визуализация осуществляется с помощью подкрашенной жидкости в воде. Фото ONERA. [Werle, 1974]



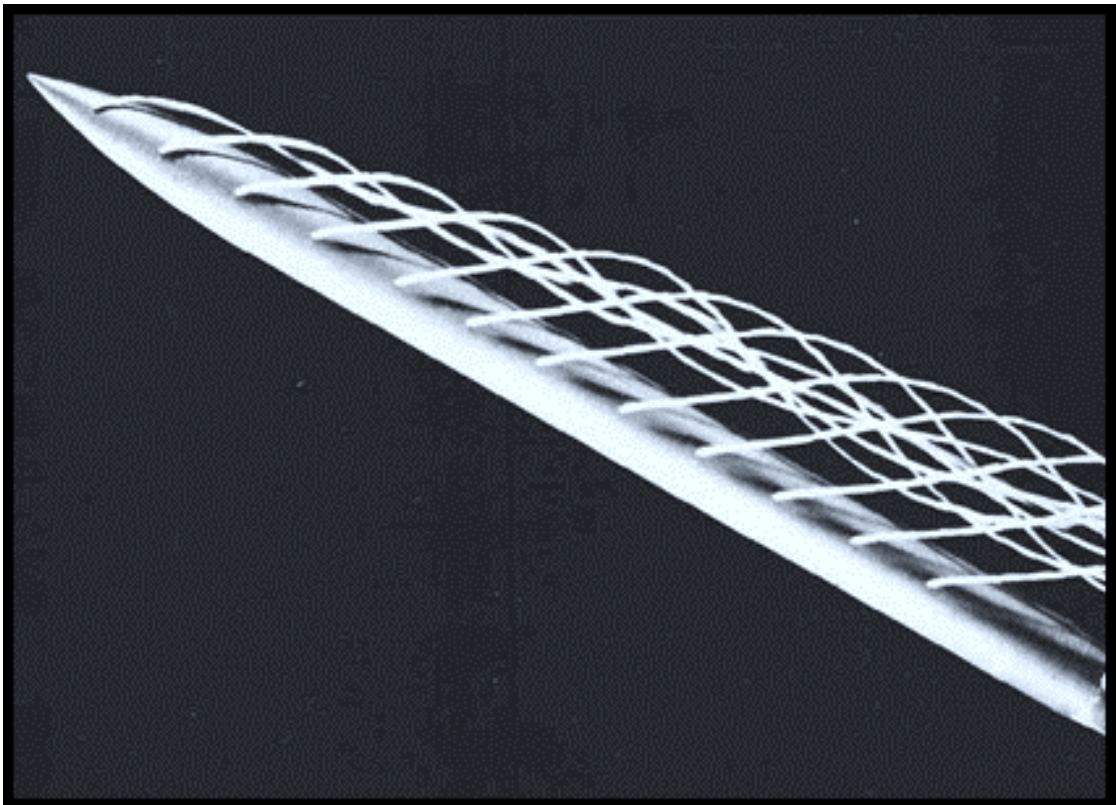
### 12. Концевые вихри, сбегаящие с прямоугольного крыла

Благодаря применению подсоса при угле атаки в  $24^\circ$  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 100000. [Head, 1982]



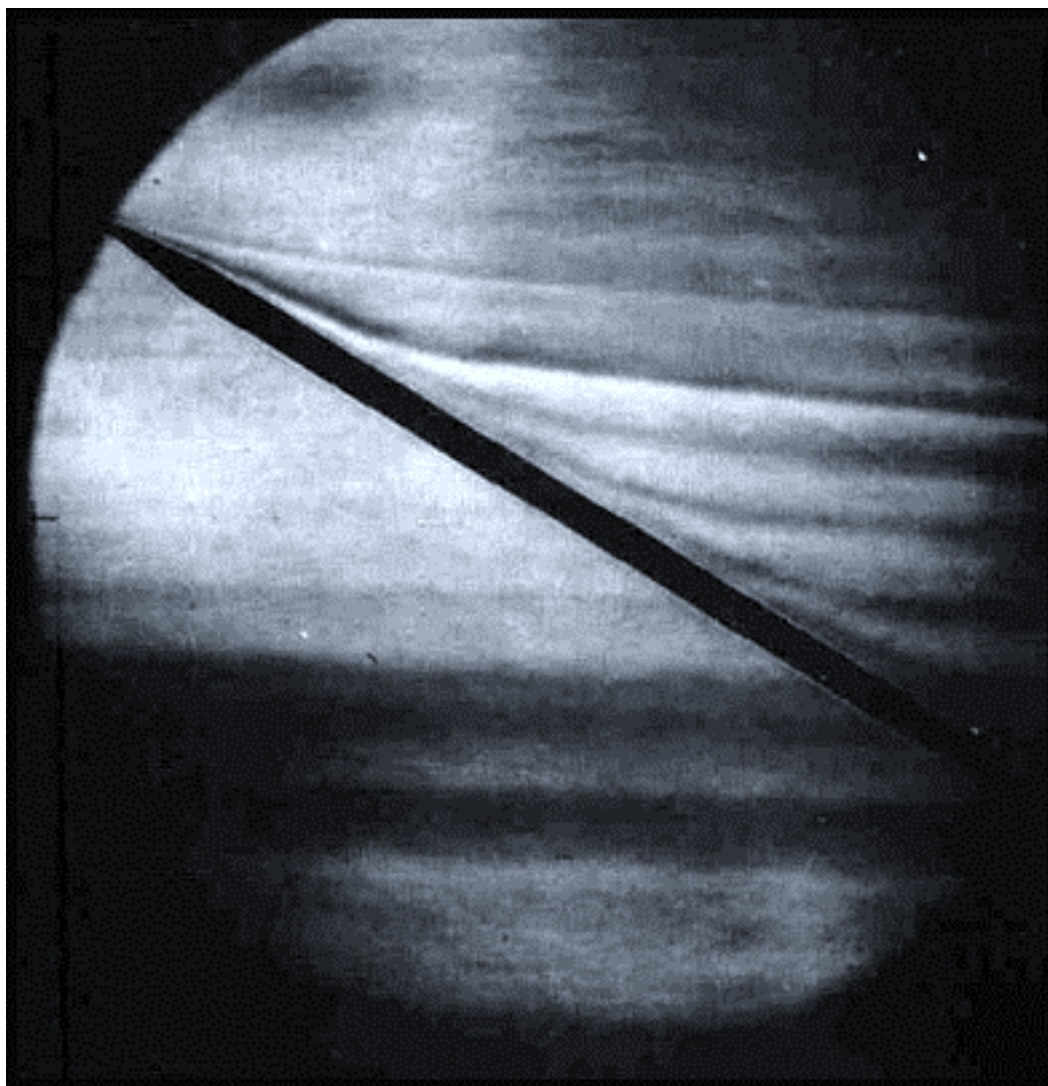
### 13. Присоединенная пара вихрей за тонким телом под углом атаки

Длинный цилиндр с носовой частью оживальной формы наклонён под углом  $30^\circ$  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 спиралью вокруг ядра ближайшего из вихрей. Число Рейнольдса, рассчитанное по диаметру 1 см, равно 400. [Flechter, 1969]



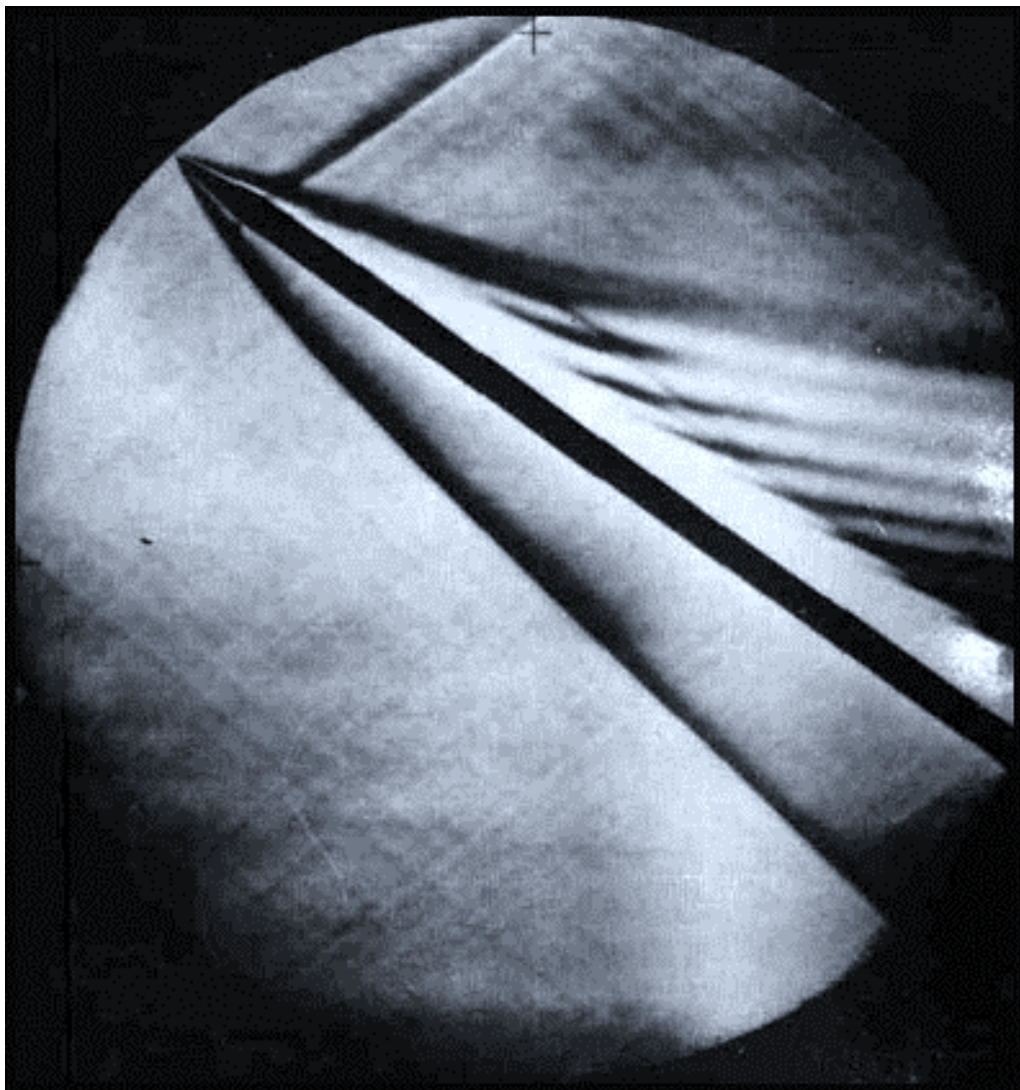
#### 14. Вихри, сходящие с тела в дозвуковом потоке

Длинное тело, состоящее из цилиндра с конической головкой, обтекается в аэродинамической трубе под углом атаки  $30^\circ$  при числе Маха 0,4. Число Рейнольдса, рассчитанное по диаметру, равно 80000. 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 20-24). Фото К. D. Thomson.



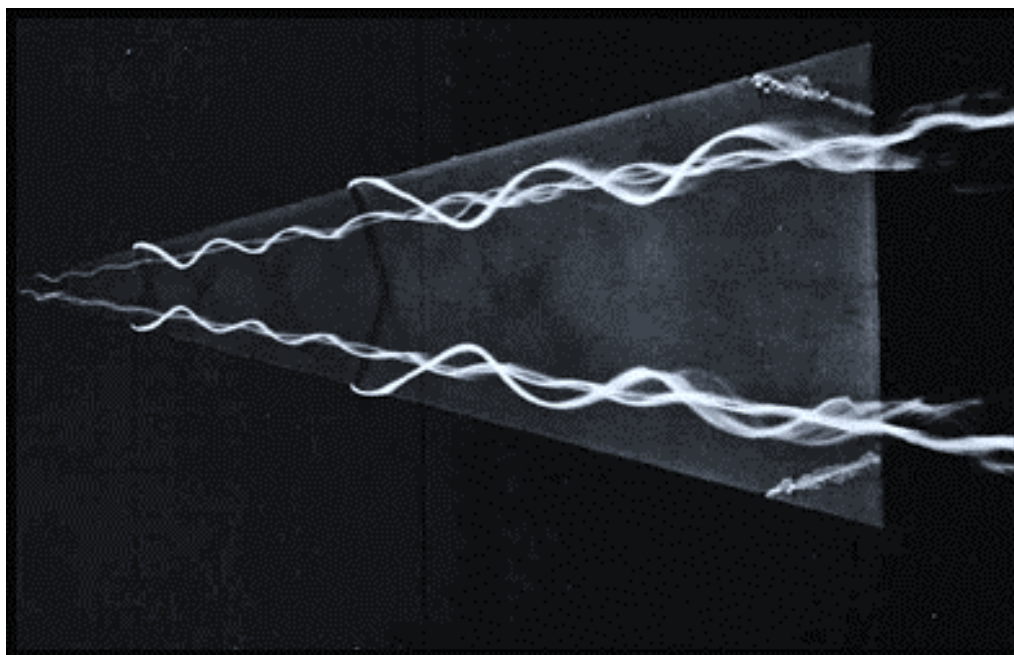
### 15. Вихри, сходящие с тела в сверхзвуковом потоке

Здесь угол атаки равен  $35^\circ$ , 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 всё 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.



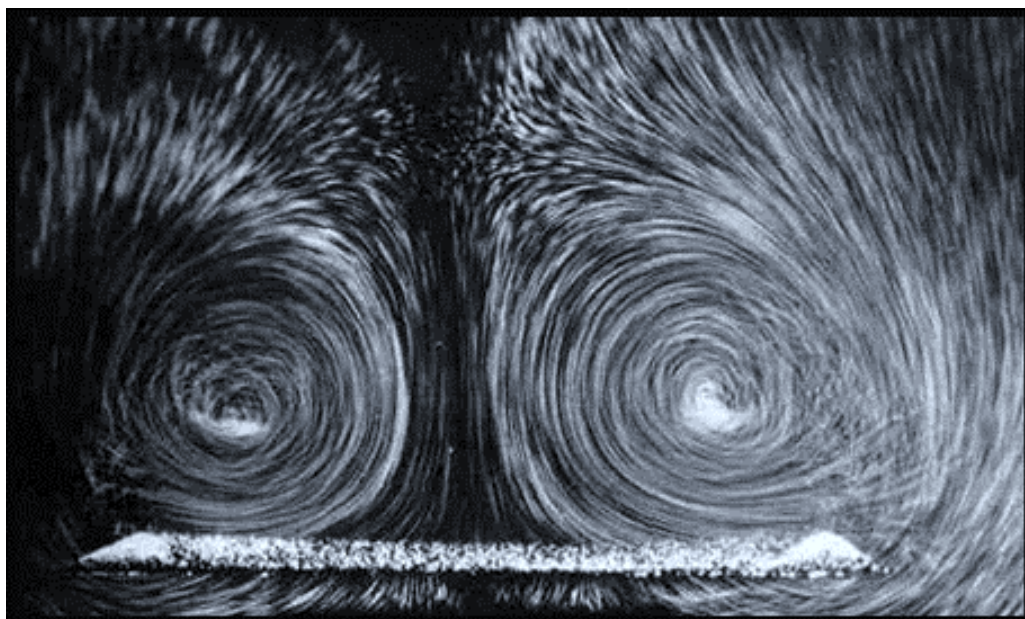
## 16. Вихри над треугольным крылом под углом атаки

Линии подкрашенной жидкости в воде демонстрируют симметричную пару вихрей за тонким крылом с полууглом раствора  $15^\circ$  под углом атаки  $20^\circ$ . 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. [Werle, 1963]



## 17. Сечение вихрей над треугольным крылом

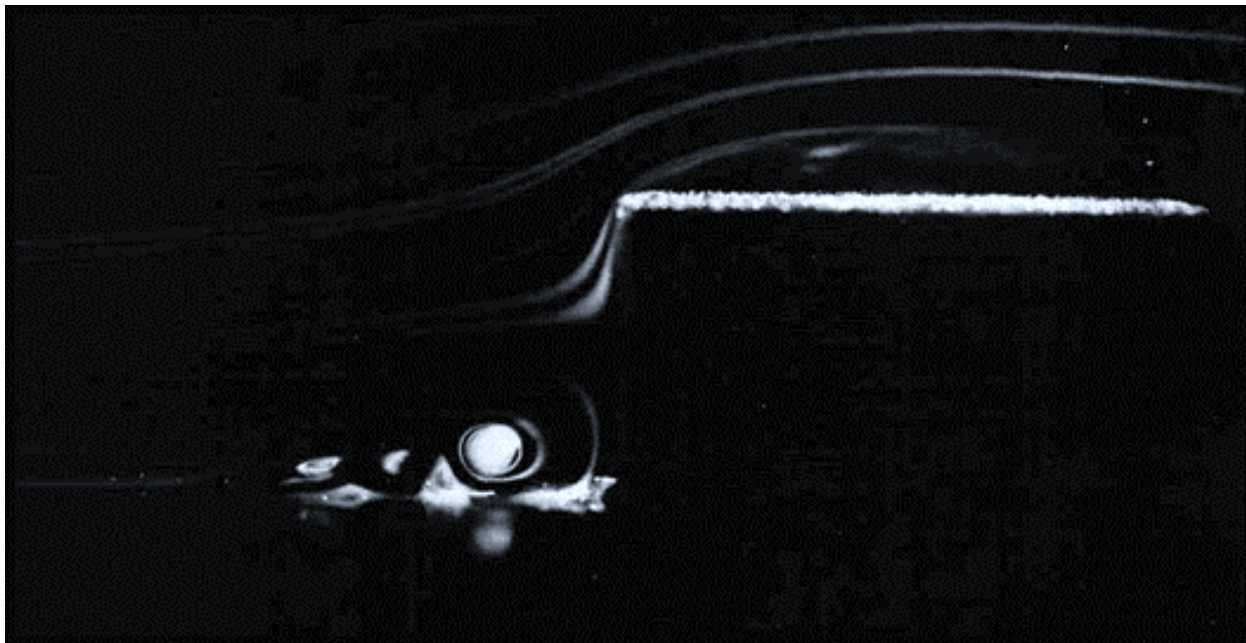
Мелкие пузырьки воздуха в воде позволяют видеть вихревую пару течения, показанного на предыдущем снимке, в сечении, проходящем через заднюю кромку крыла. Фото ONERA. [Werle, 1963]





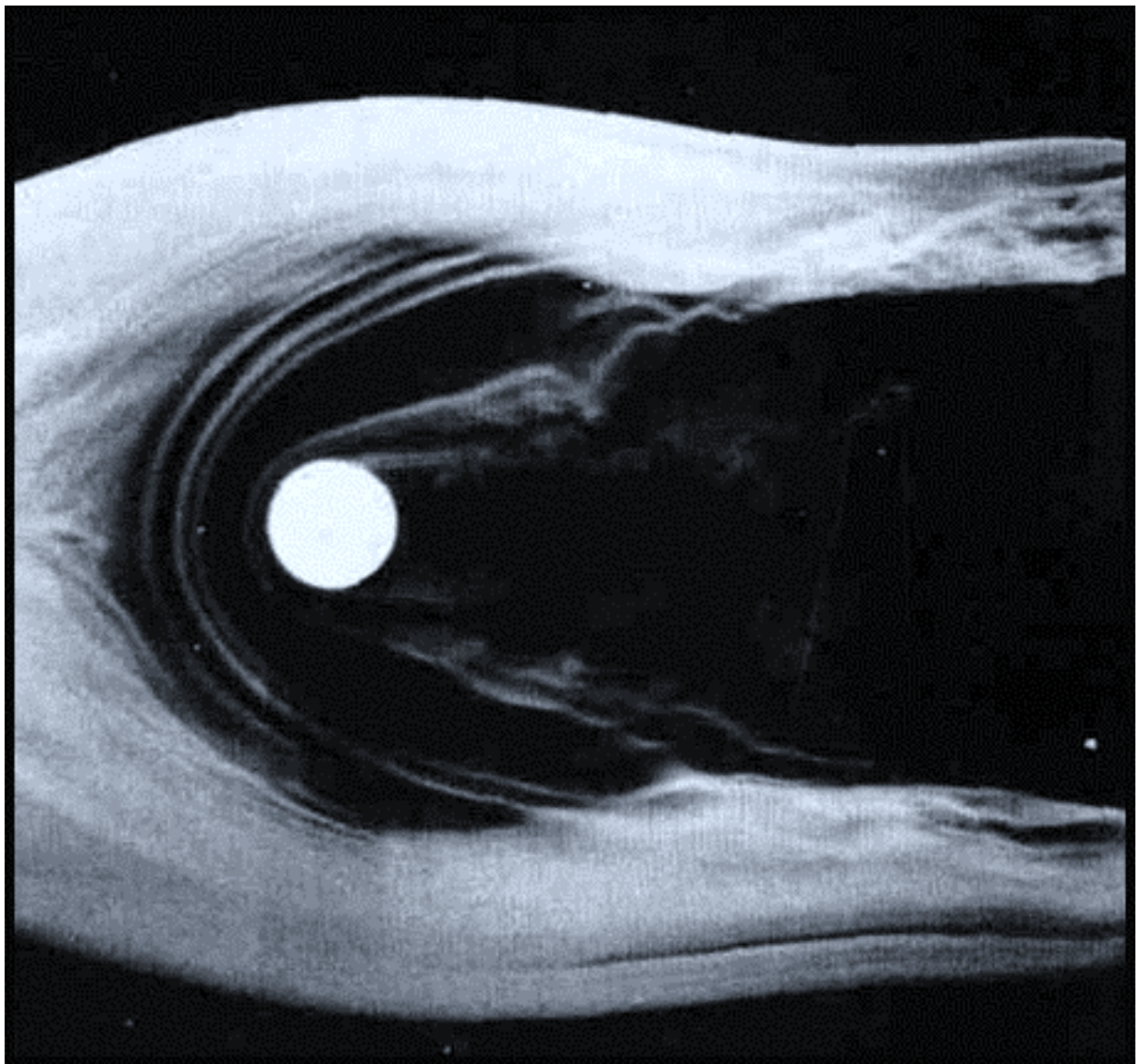
### 18. Подковообразные вихри перед цилиндром в пограничном слое

Ламинарный пограничный слой на плоской пластинке отрывается впереди короткого кругового цилиндра, высота которого примерно в три раза больше толщины пограничного слоя. Завихрённость в пограничном слое концентрируется в трёх 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 цилиндра, 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 E. P. Sutton и Cambridge University Engineering Department.



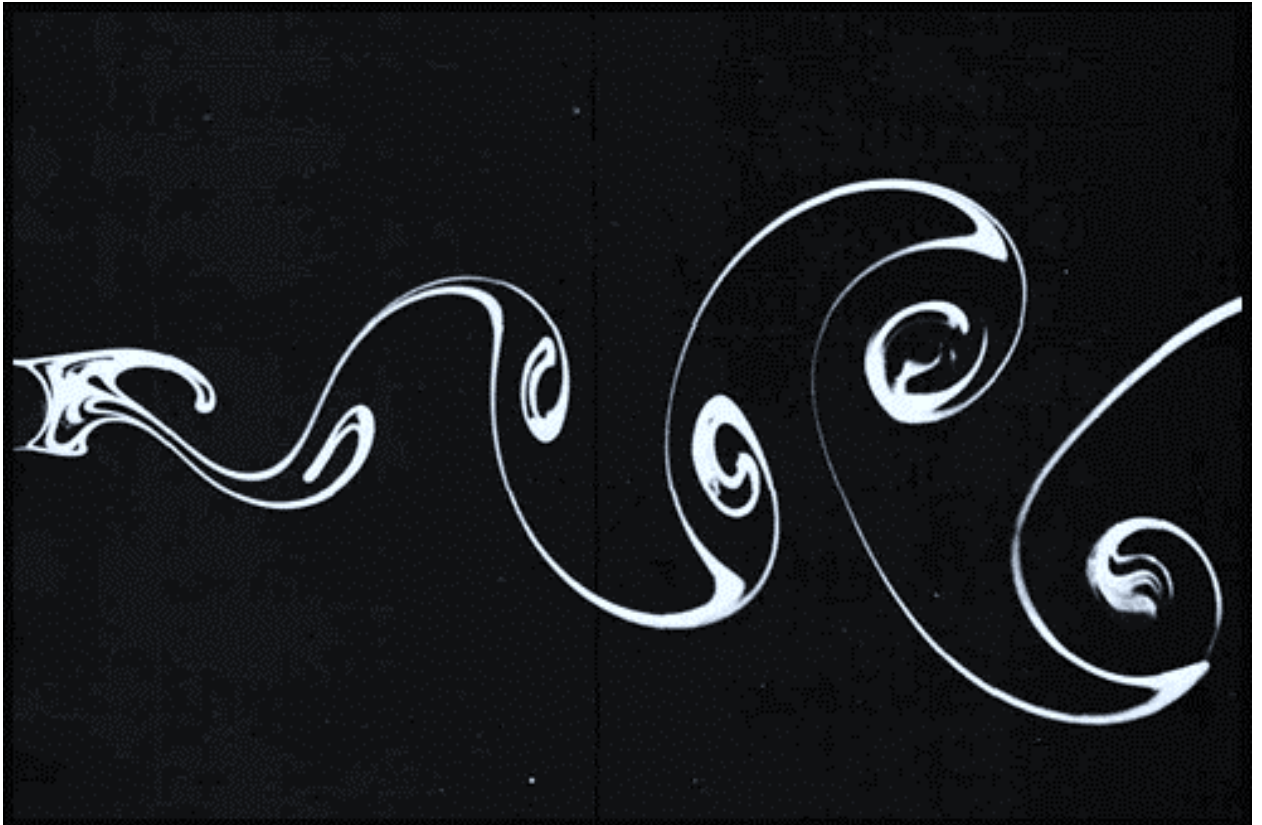
### 19. Подковообразные вихри перед цилиндром в пограничном слое

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.



## 20. 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 метятся белым коллоидным дымом, создаваемым электролитическим способом и освещаются световым ножом. Видно, что по мере продвижения вниз по потоку на несколько диаметров ширина вихревой пелены возрастает. Фото Sadatoshi Taneda.



## 21. 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 Koormann.



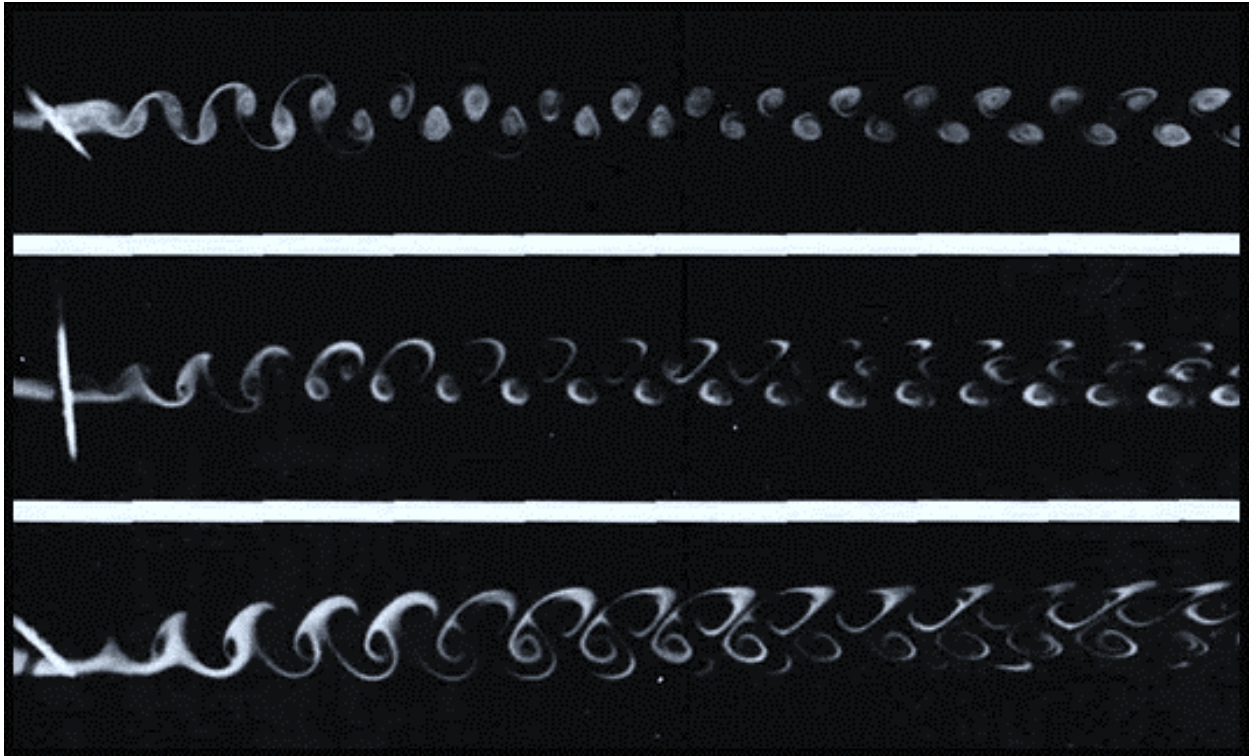
## 22. Вихревая дорожка Кармана за круговым цилиндром при $Re=105$

Расширяющаяся сперва спутная струя, показанная на двух предыдущих снимках, развивается в два параллельных ряда шахматно расположенных вихрей. Теория Кармана, построенная без учёта вязкости, показывает, что такая дорожка устойчива при отношении её ширины к продольному расстоянию между вихрями, равном 0,28. Визуализация движения в воде осуществляется электролитическим способом. Фото Sadatoshi Taneda.



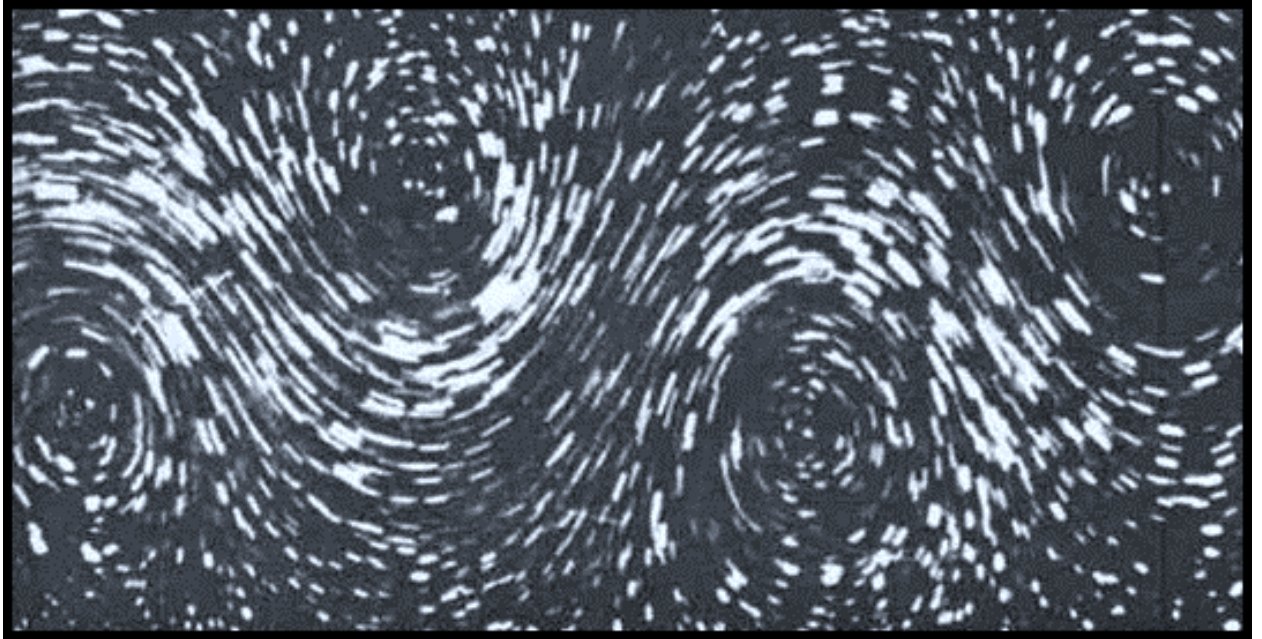
### 23. Дымовые струйки в вихревой дорожке на различных уровнях

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]



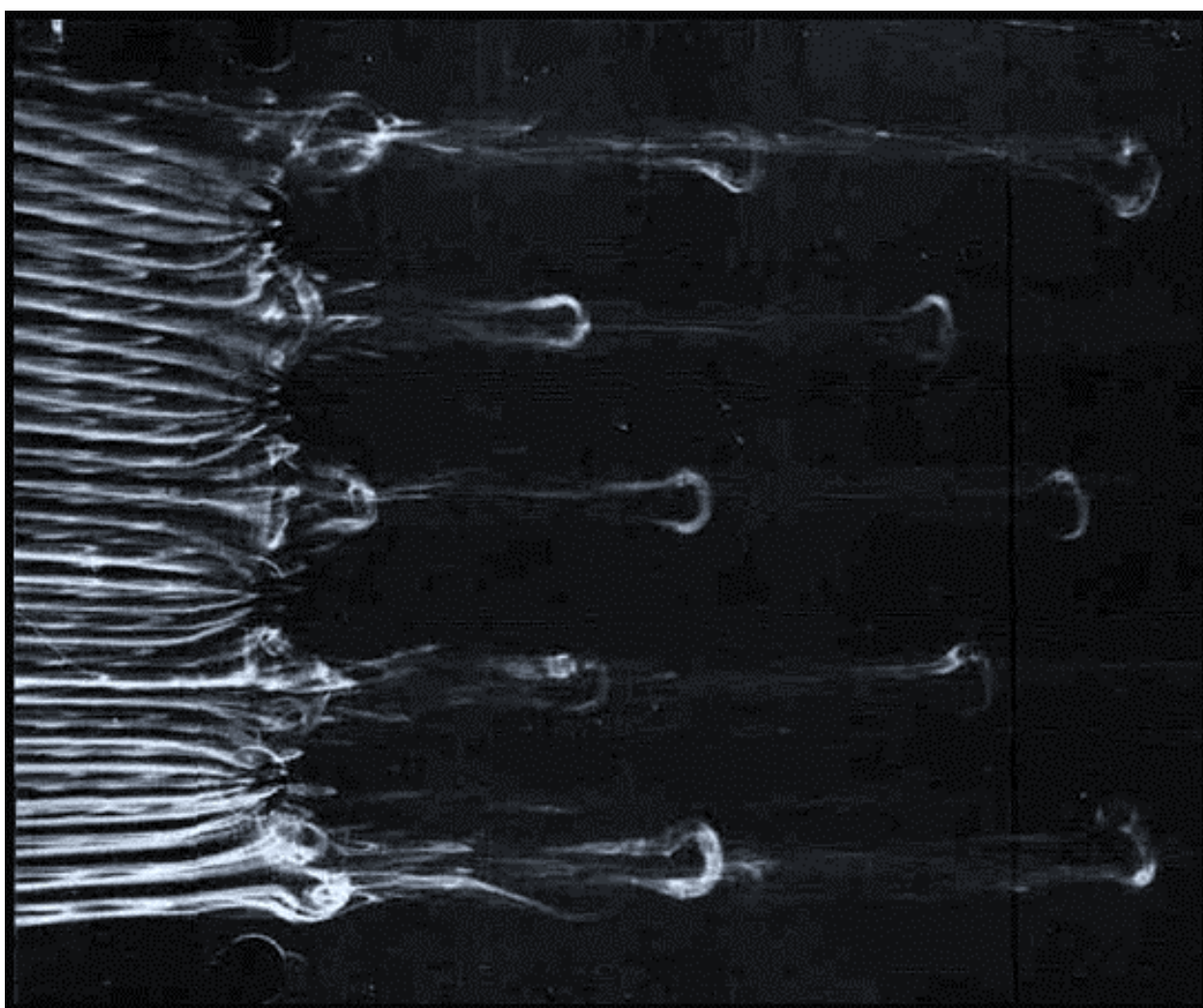
## 24. Вихри Кармана в абсолютном движении

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.



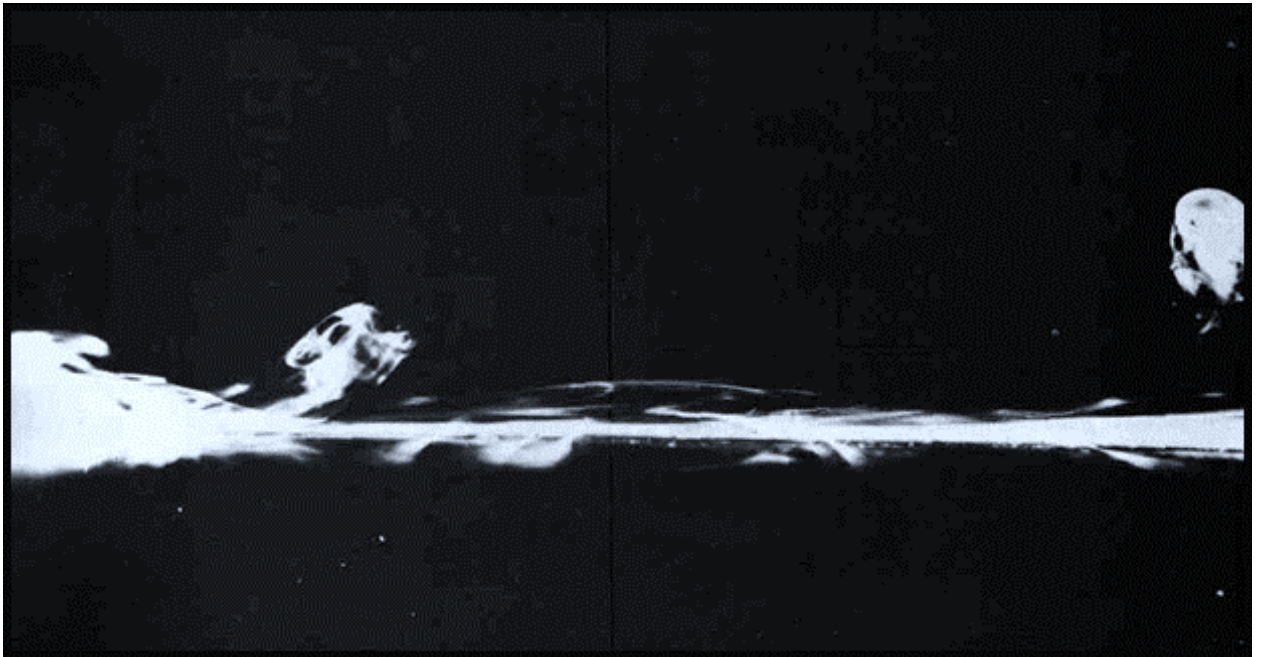
## 25. Подковообразные вихри в ламинарном пограничном слое, вид в плане

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.



## 26. Подковообразные вихри в ламинарном пограничном слое, вид сбоку

Сбоку видно, как вихревые петли, показанные на предыдущем снимке, по мере своего продвижения вниз по потоку поднимаются значительно выше границы пограничного слоя. Фото Peter Bradshaw и Aerodynamics Division, National Physical Laboratory.





## 27. 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.

