Методы визуализации потока в аэродинамических трубах делятся на **поверхностные** и **пространственные**.

К основным поверхностным методам, то есть к методам визуализации течений на **поверхности** модели относятся:

- метод шелковинок;
- метод каолина;
- метод масляной плёнки;
- метод размываемых точек;
- метод термоиндикаторных покрытий.

К основным пространственным методам визуализации течений **около моделей** в аэродинамических трубах относятся:

- метод шелковинок и экрана с шелковинками
- дымовые методы;
- оптические методы (теневые, интерференционные, голографические);
- метод лазерного ножа;
- метод нагретой проволочки;
- метод высоковольтного разряда.
- Метод стробоскопической визуализации
- Метод движущихся частиц (PIV метод)

К основным пространственным методам визуализации течений около моделей в гидродинамических трубах относятся:

- метод подкрашенных струек тока;
- метод водородных пузырьков.

Визуализация в гидродинамике

Метод подкрашенных струек

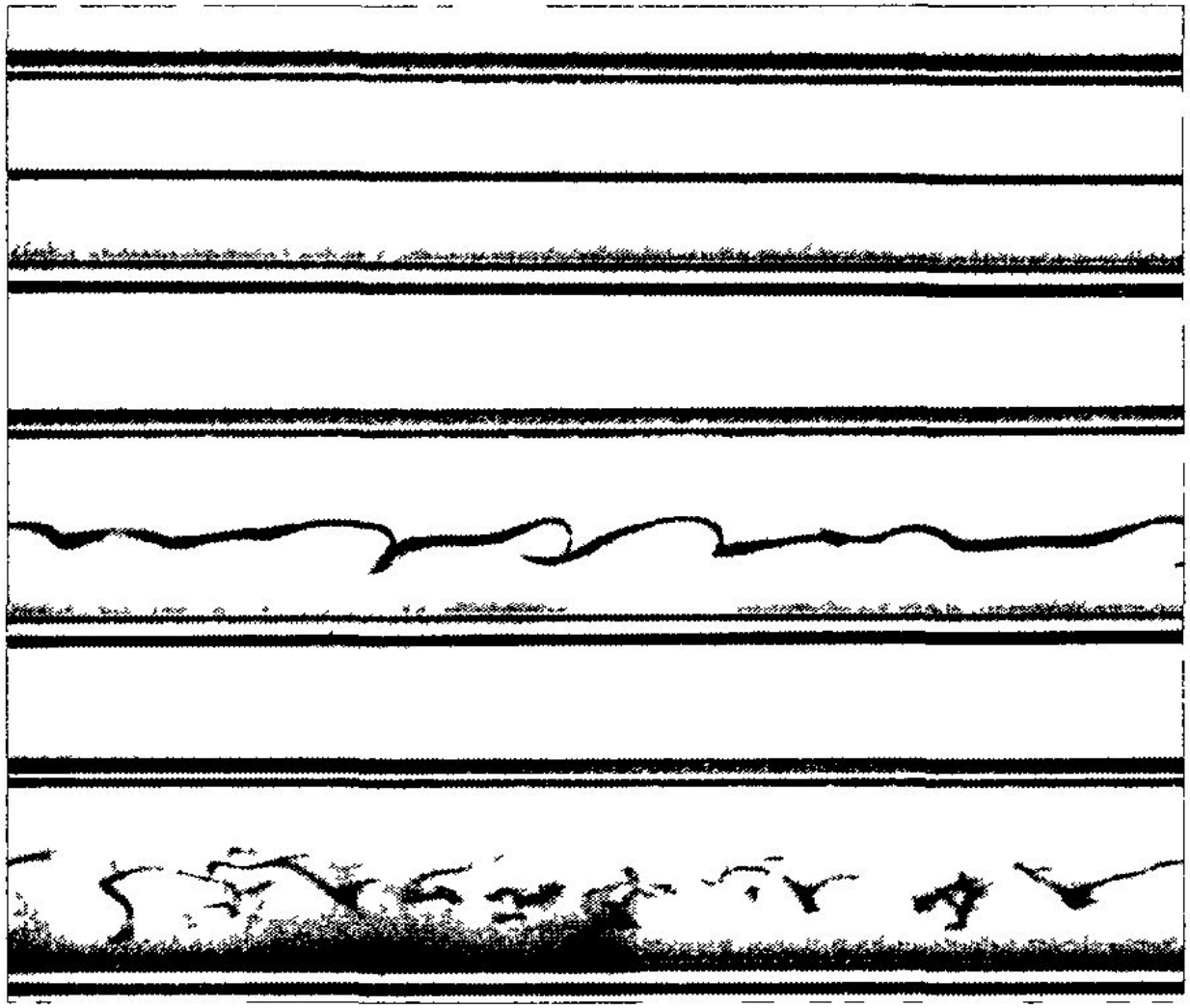
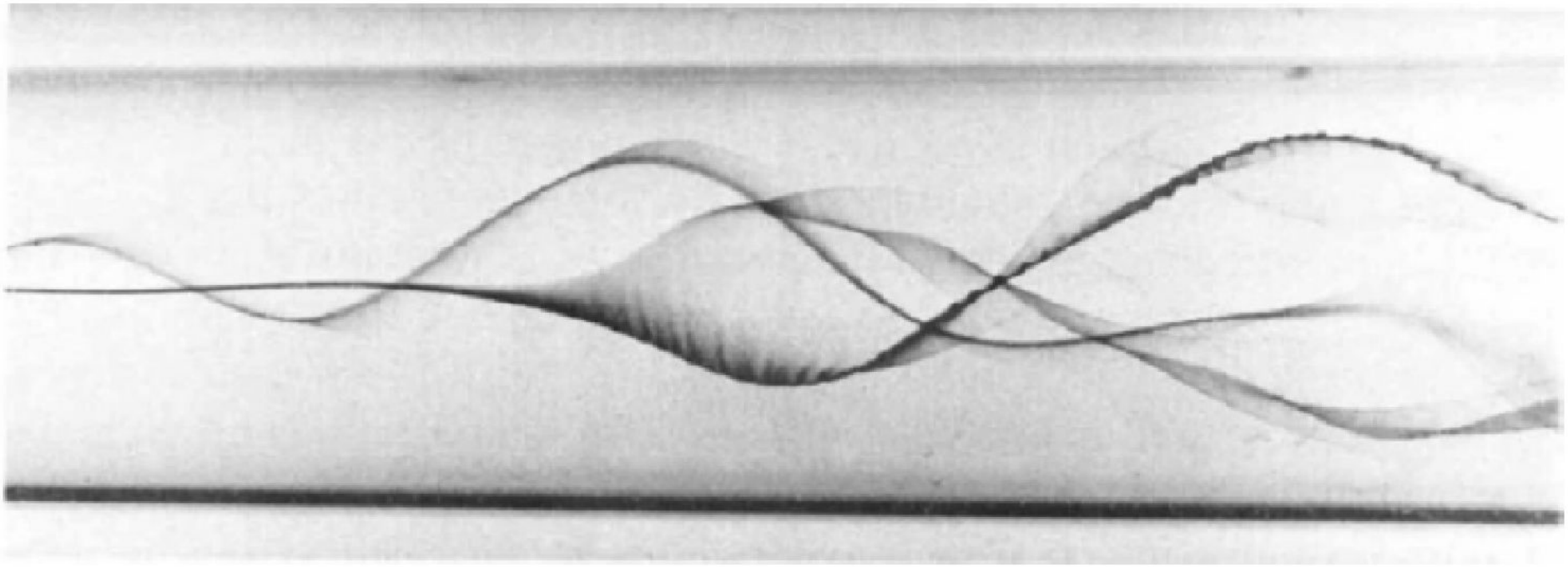


Рис. 6.1. Знаменитый эксперимент О. Рейнольдса



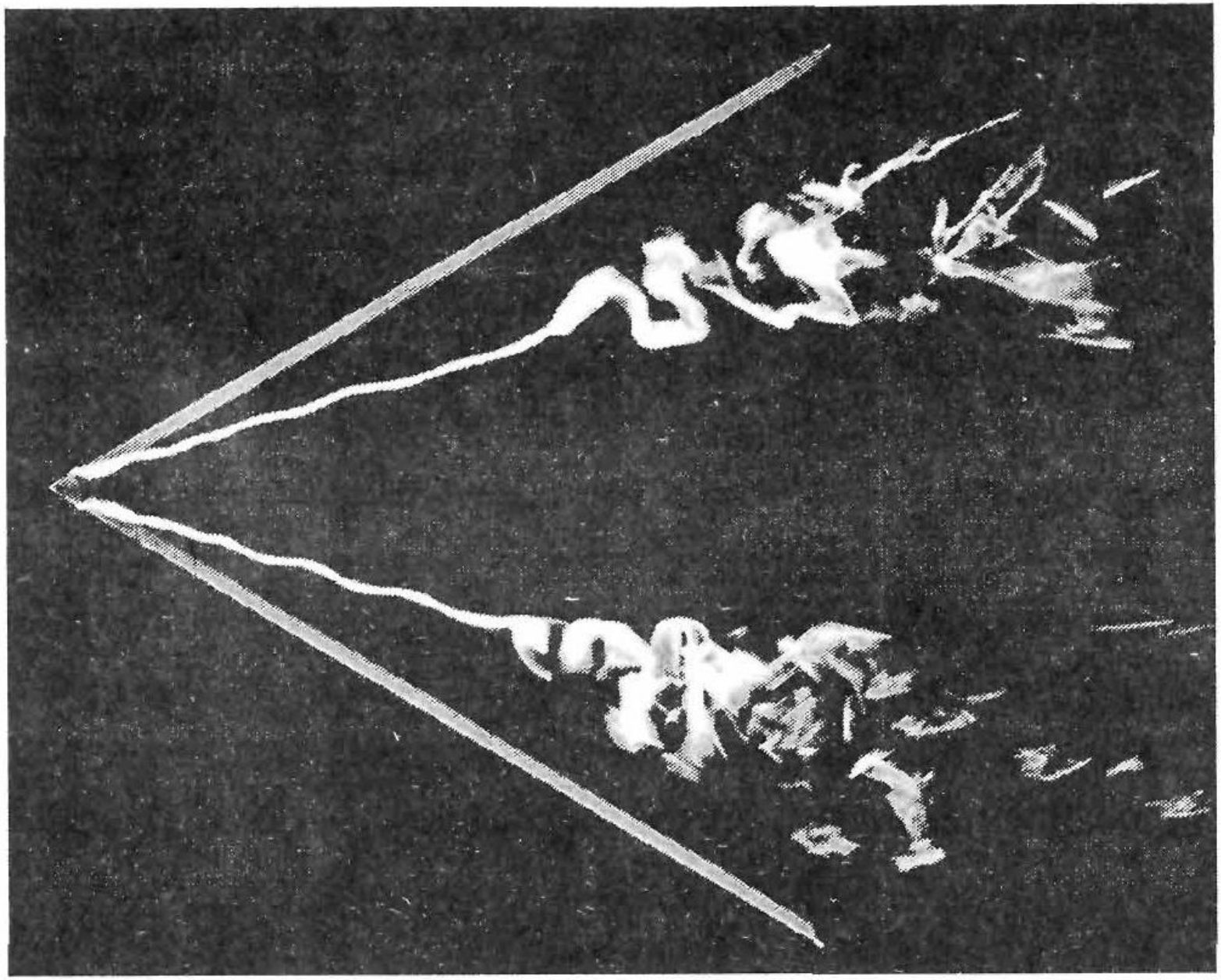


Рис. 6.2. Визуализация разрушения вихрей над треугольным крылом

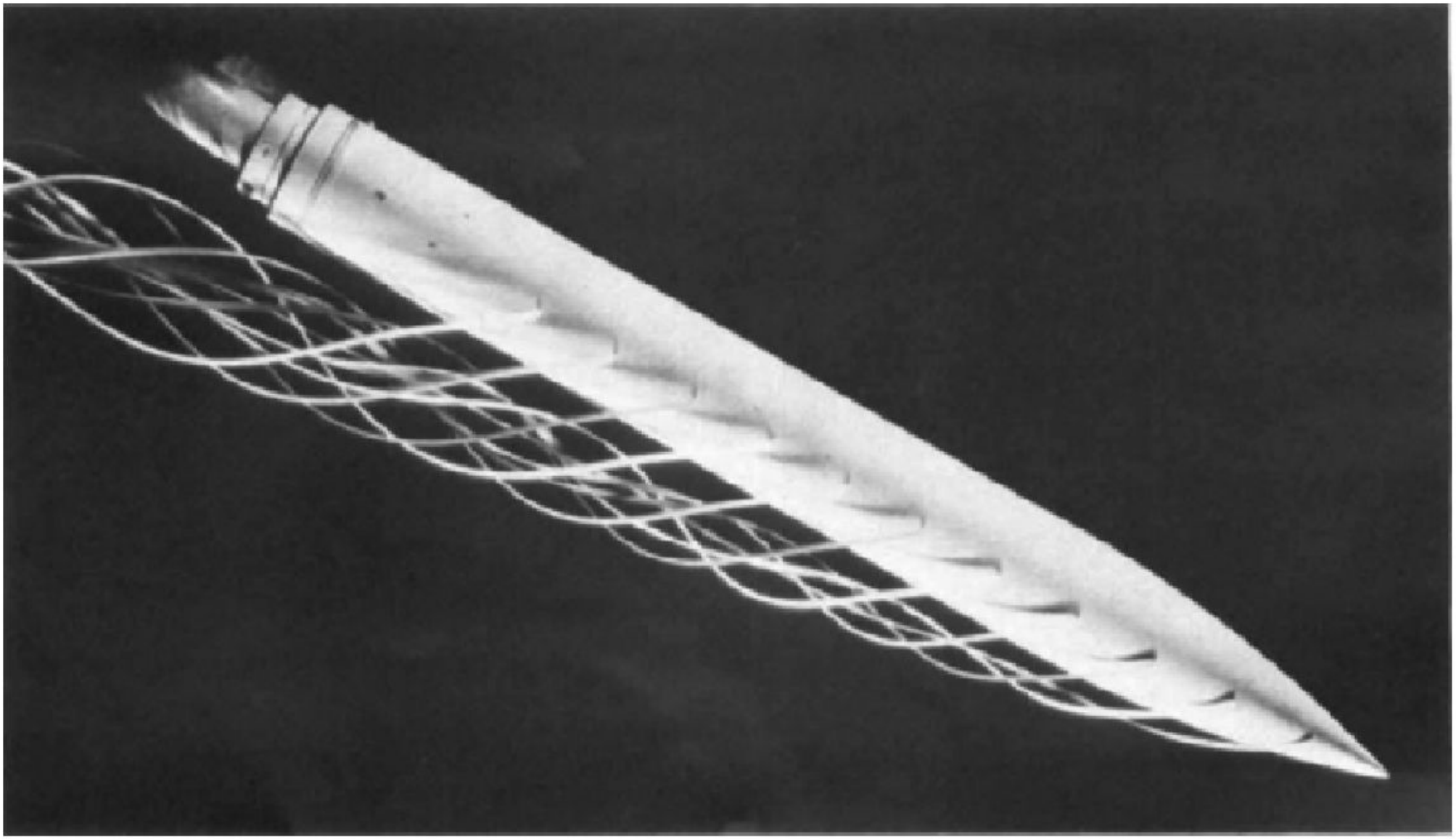
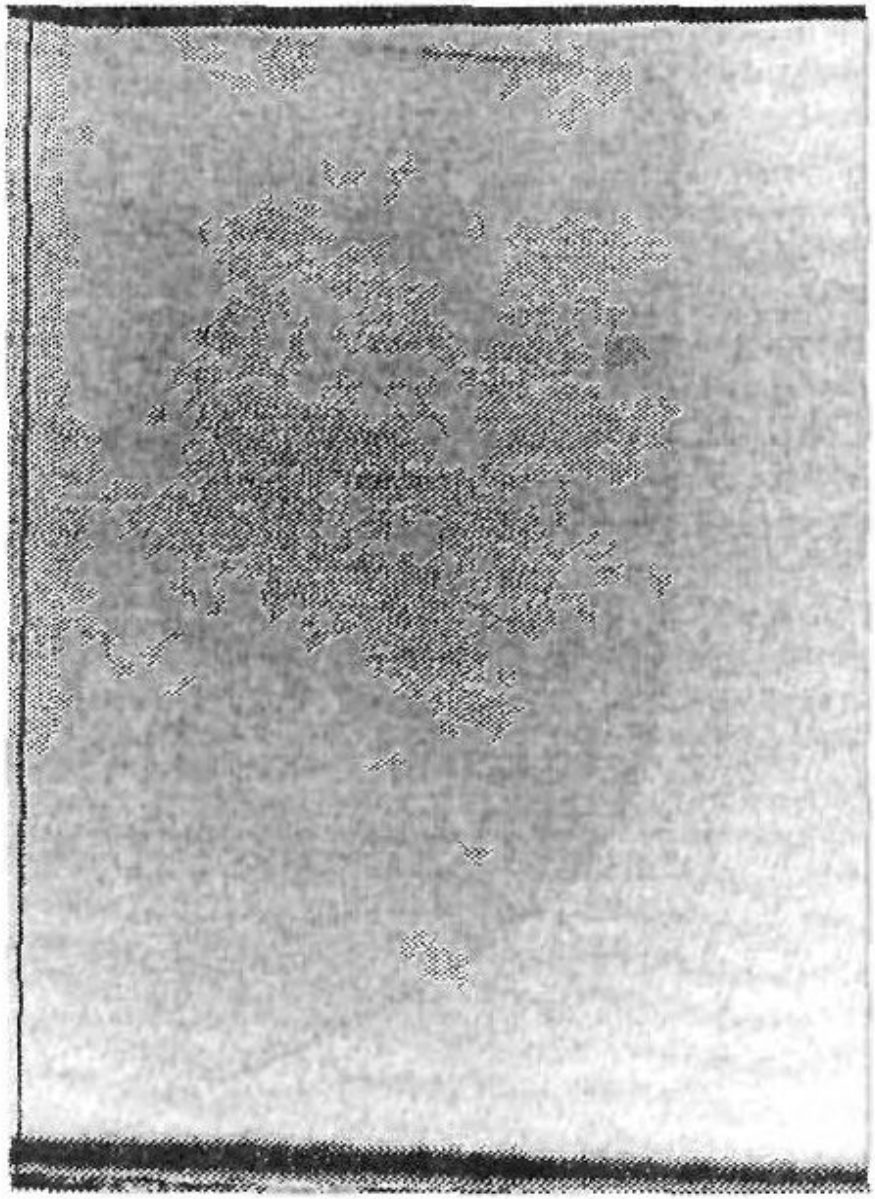


Fig. 2.2 Dye lines in the vortex flow behind a yawed cylinder. The fluid is water and the dye is a mixture of ink, milk, and alcohol. The color of the original dye lines is red, yellow, and blue. (From Fiechter, 1969.)

Метод теллуровой проволоки



Метод водородных пузырьков

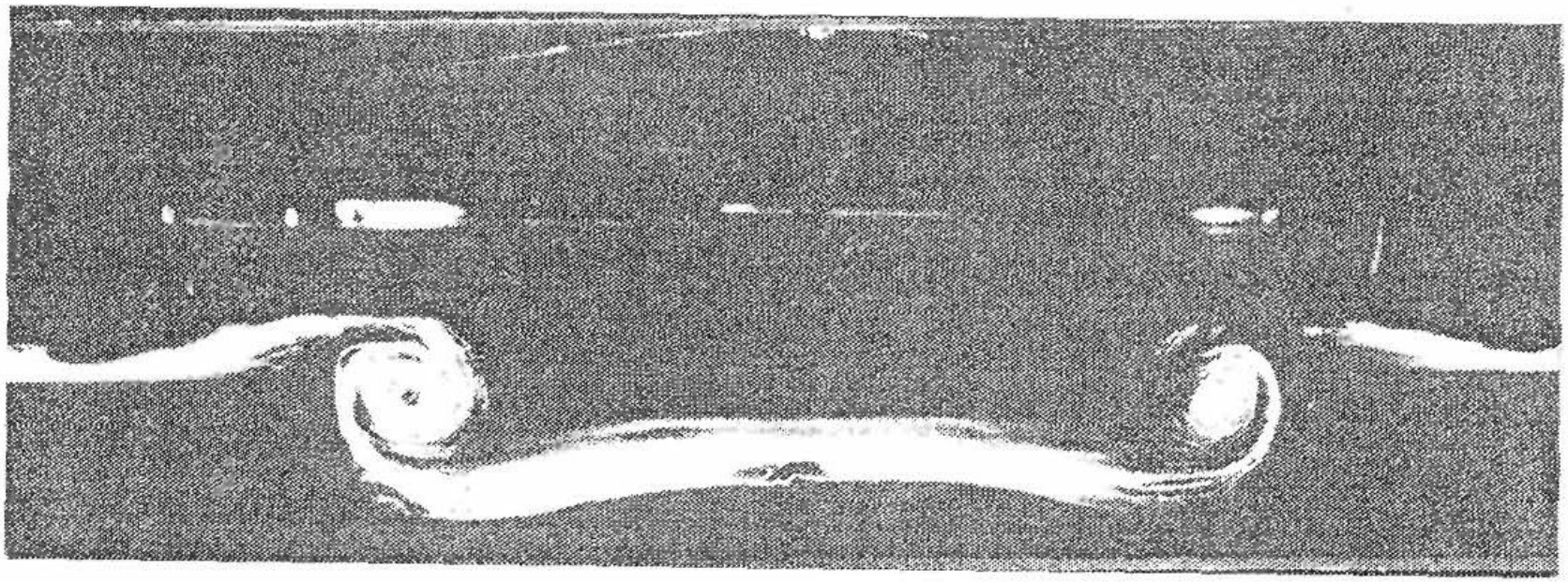
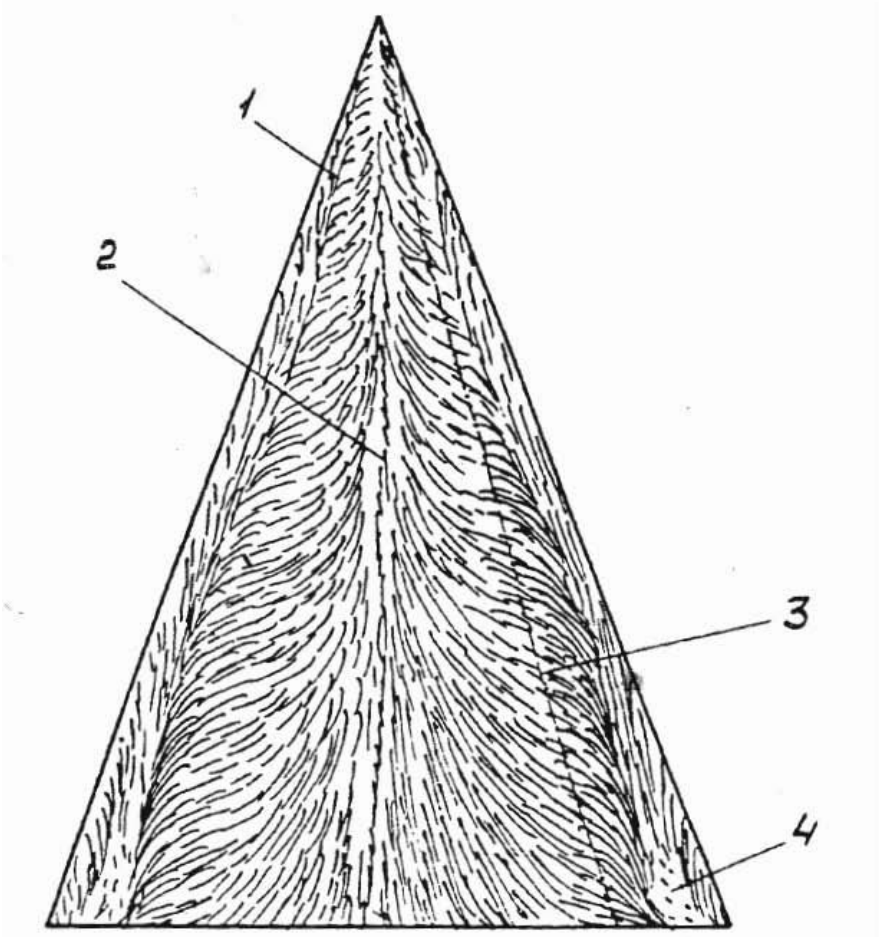


Рис. 6.4. Сечение вихревой пелены за прямоугольным крылом

Метод размываемых (масляных точек)



К методу размываемых капель: *1* — линия вторичного отрыва; *2* — линия присоединения; *3* — проекция оси вихря на плоскость крыла; *4* — застойная зона

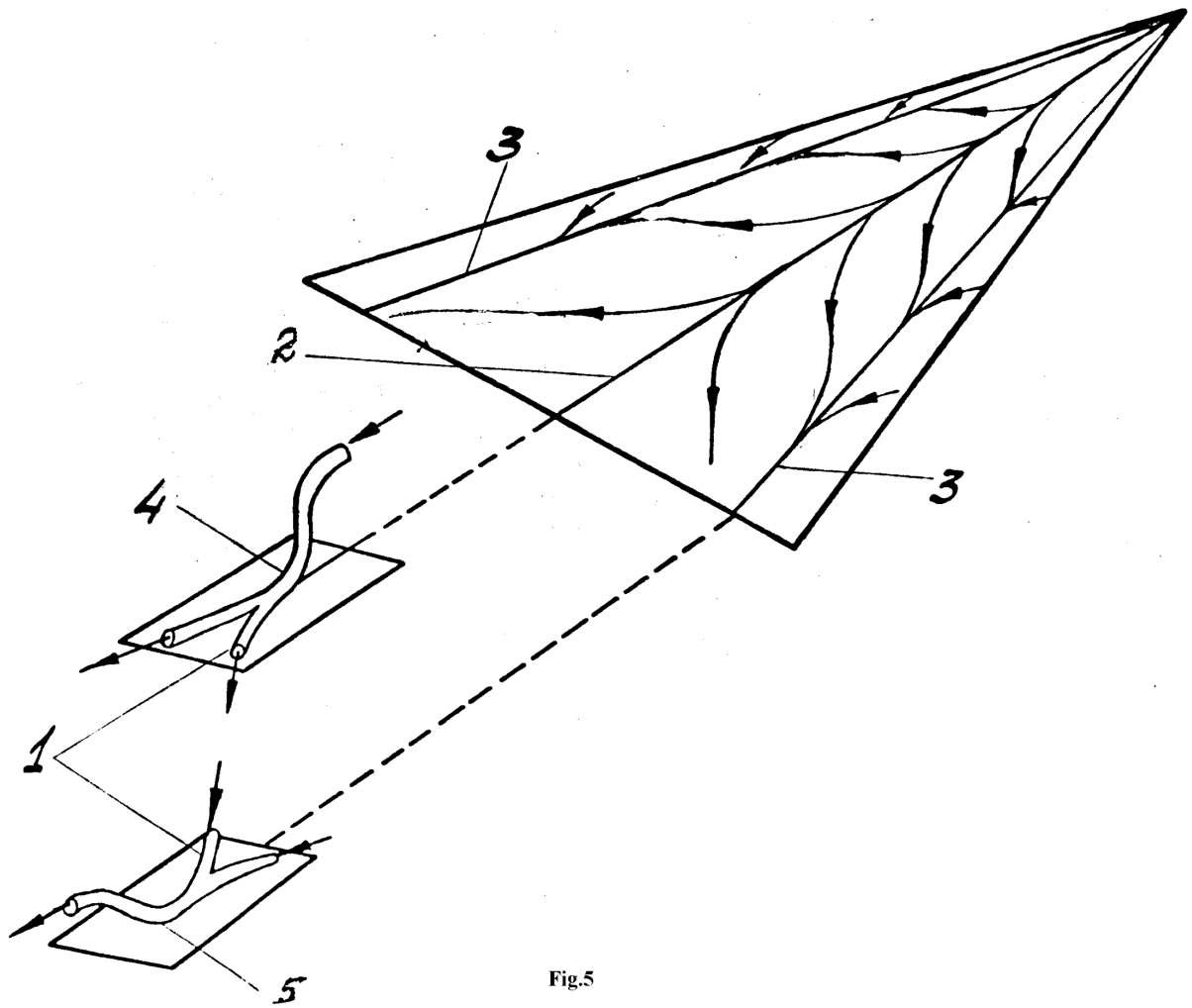


Fig.5

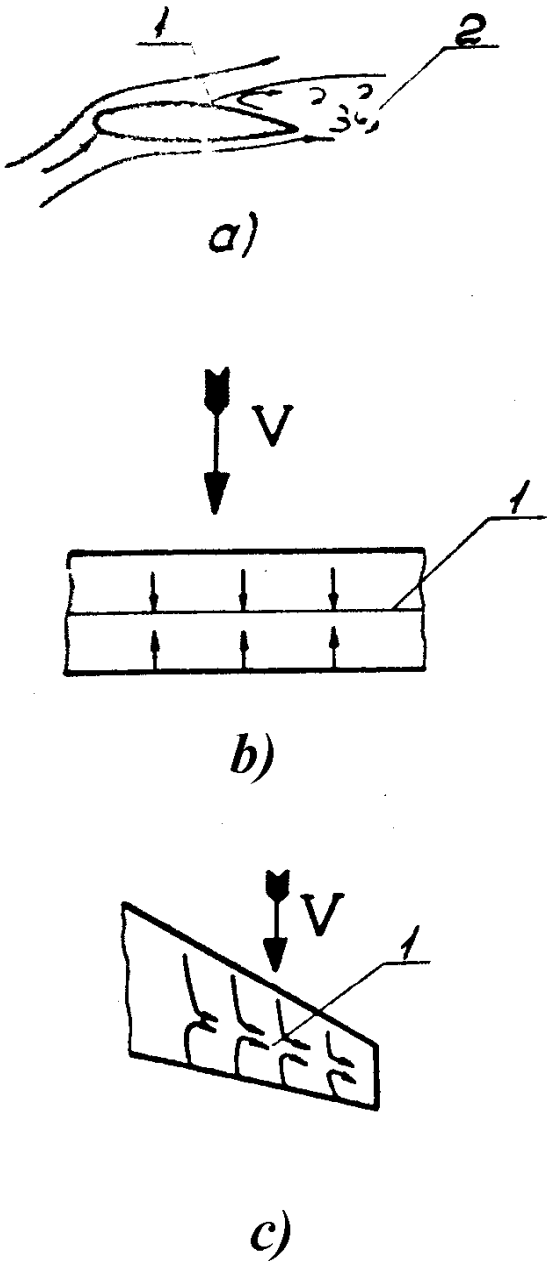


Рис. 1

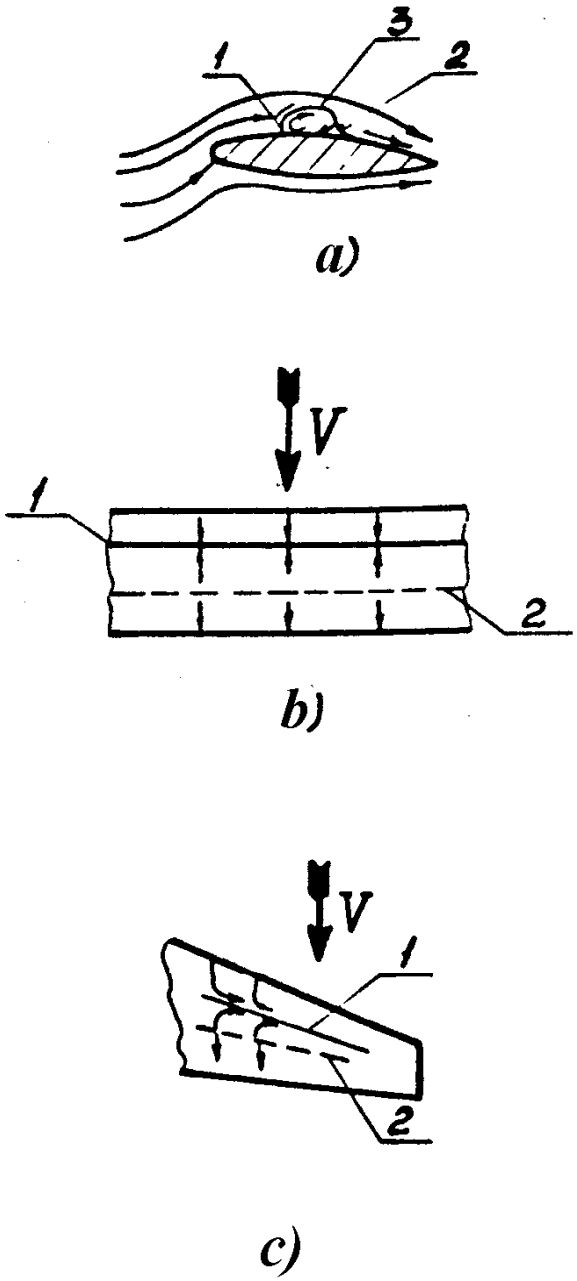


Рис. 2

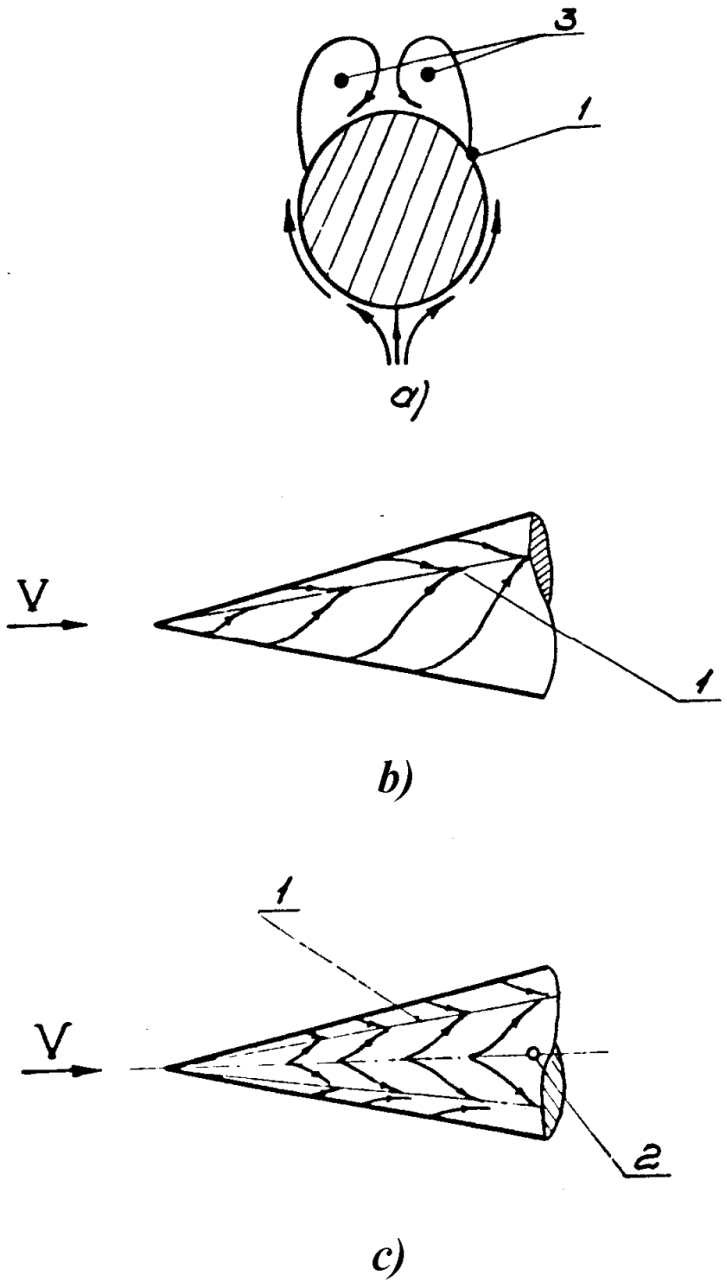


Рис. 6

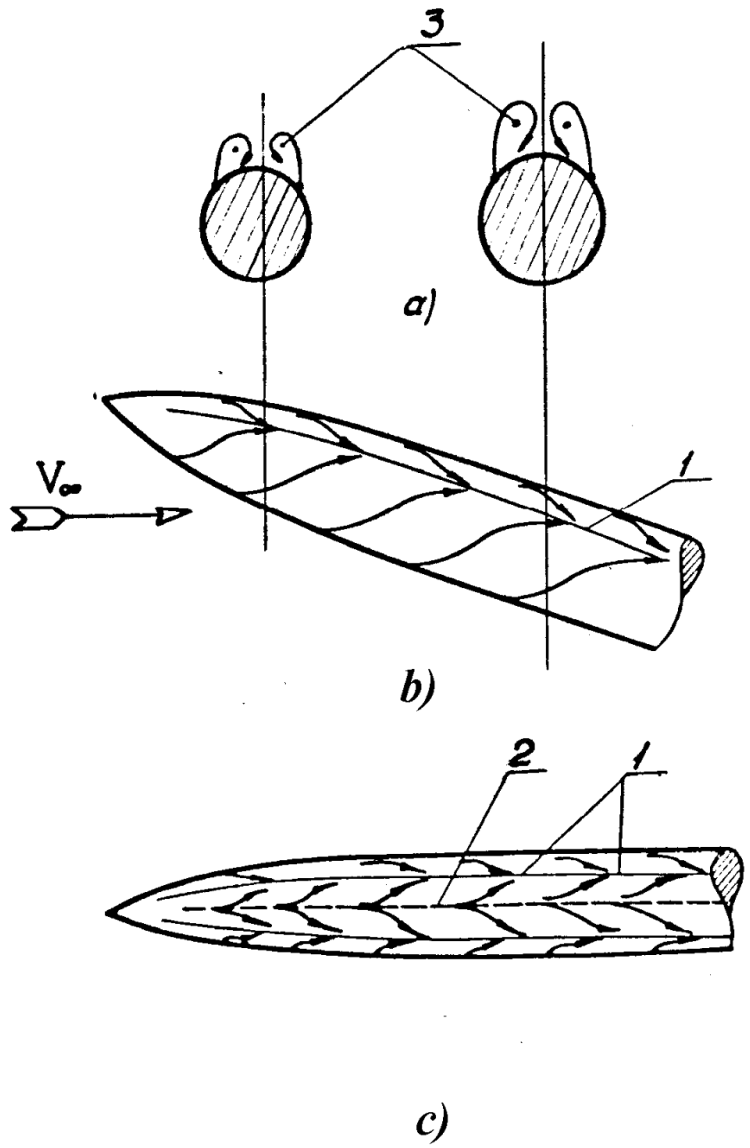


Рис. 7

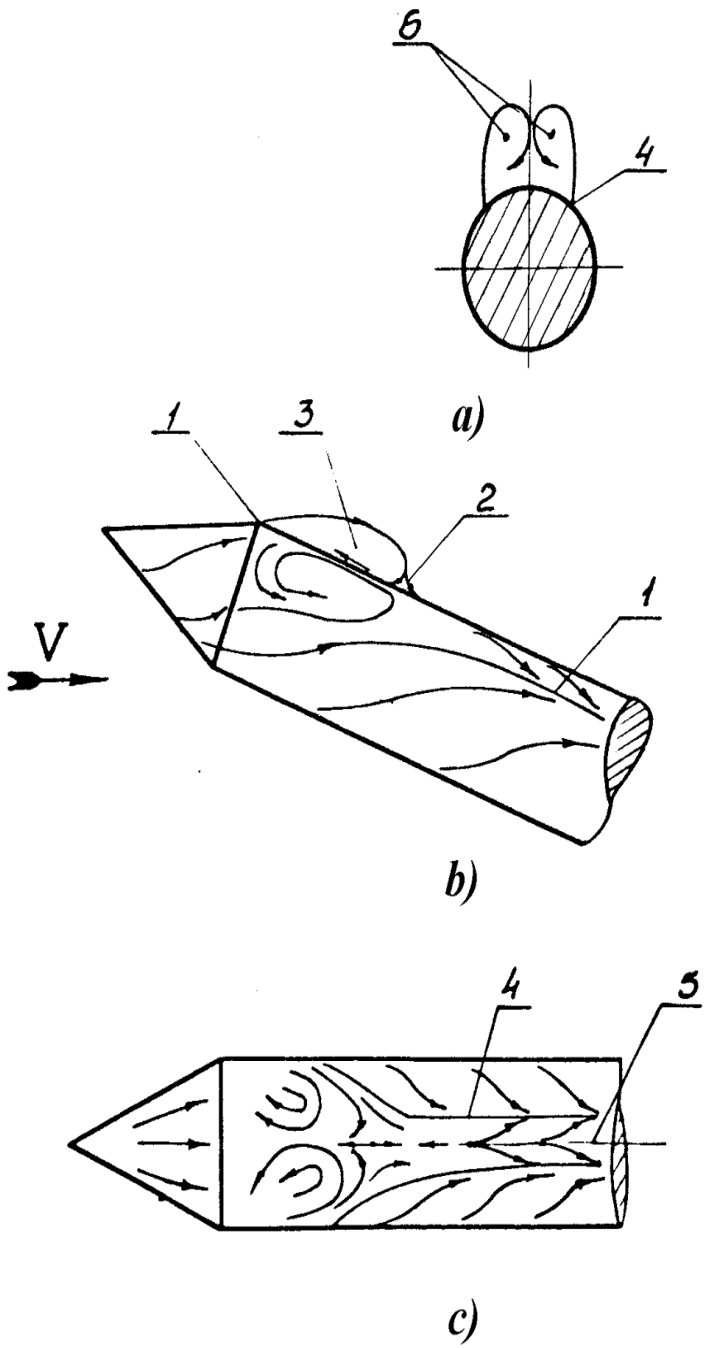

6
4
a)
1
3
2
1
V
b)
4
5
c)

Рис. 8

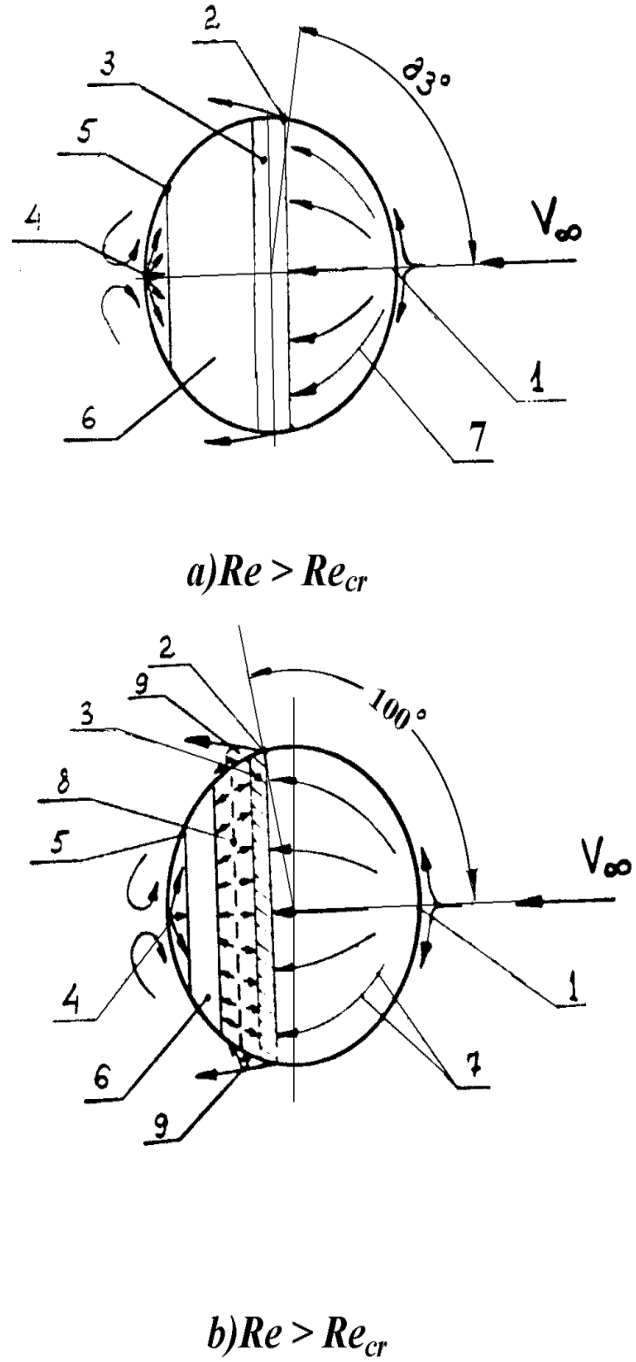
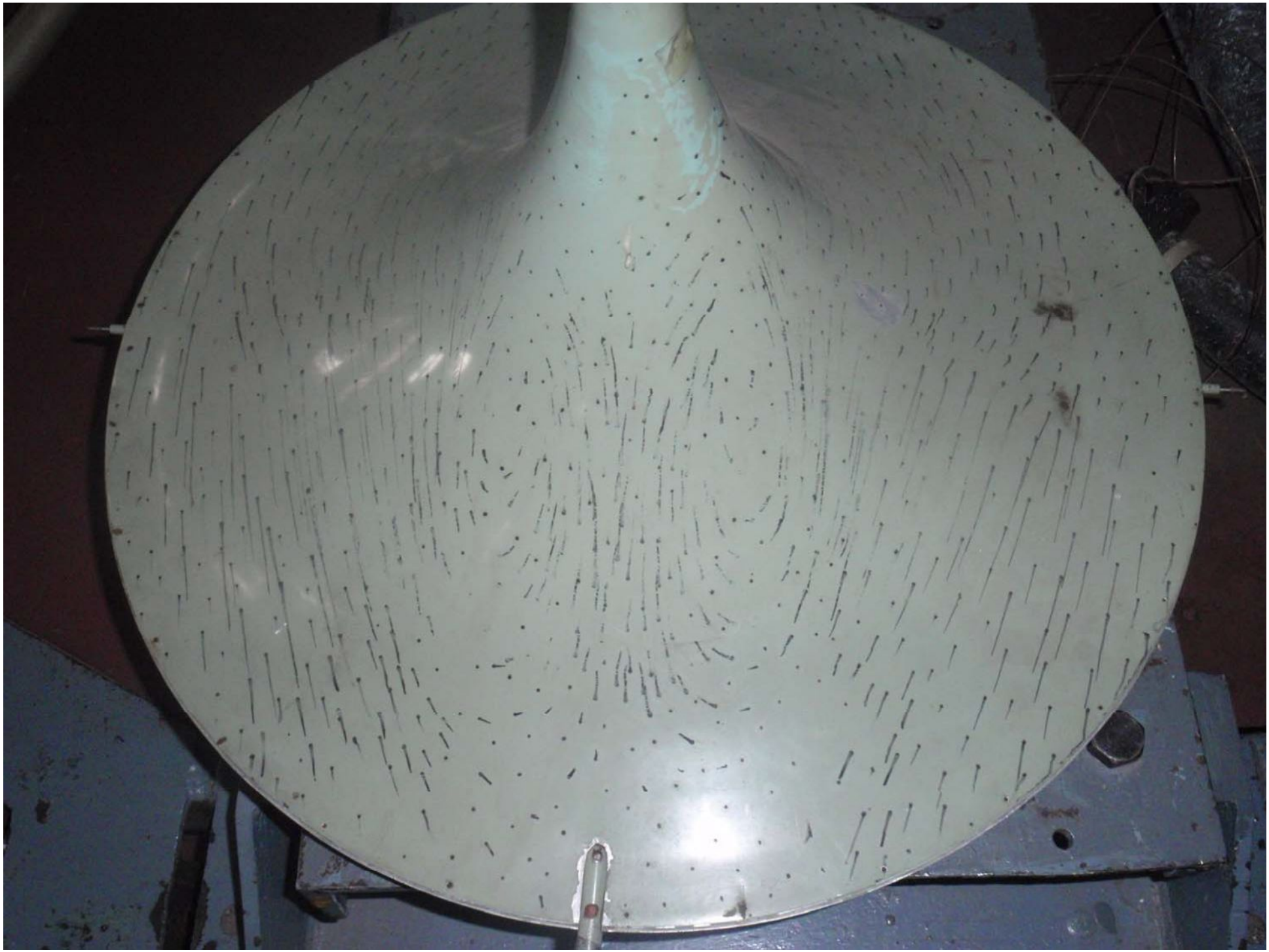
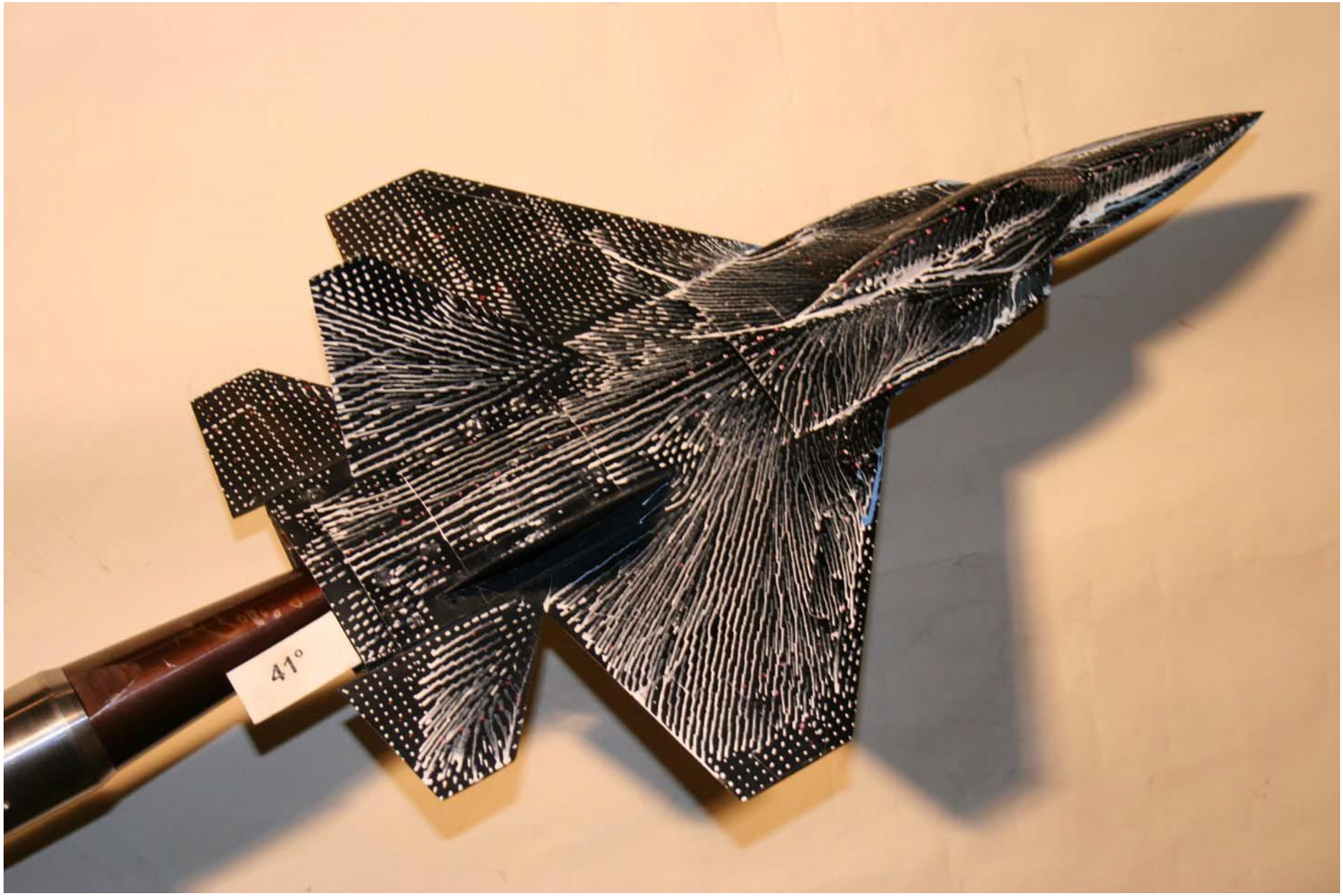
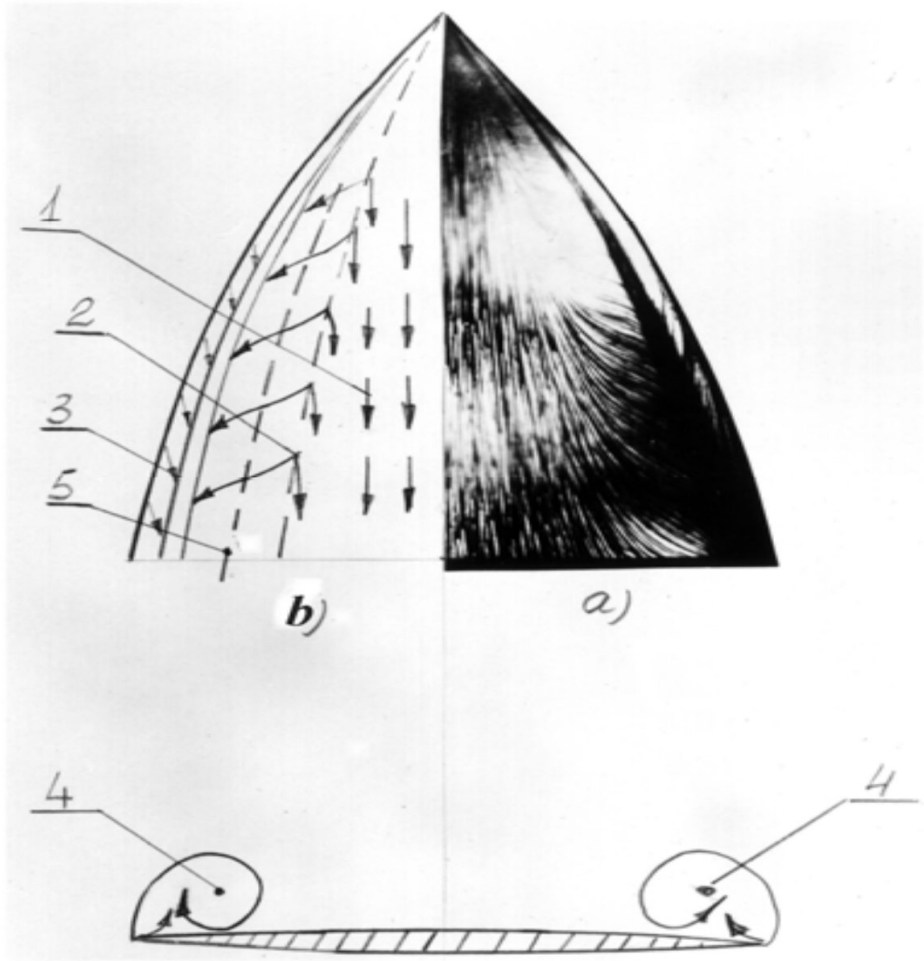

2
3
5
4
6
1
7
V_∞
a)Re > Re$_{cr}$
2
9
3
8
5
4
6
9
1
7
100°
V_∞
b)Re > Re$_{cr}$

Рис. 9




41°

Метод масляной пленки



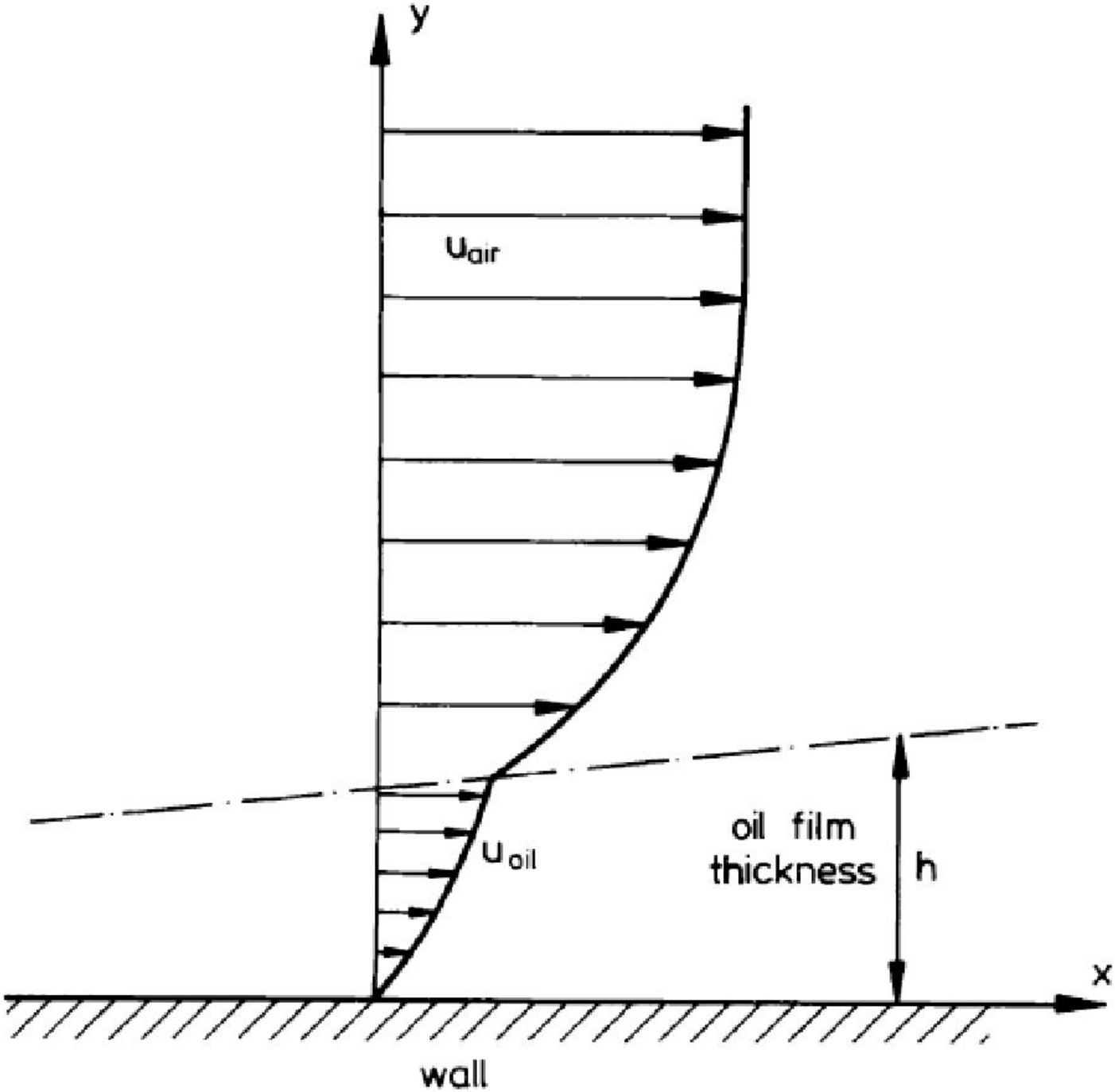


Fig. 2.43 Velocity profiles in air flow and oil film.

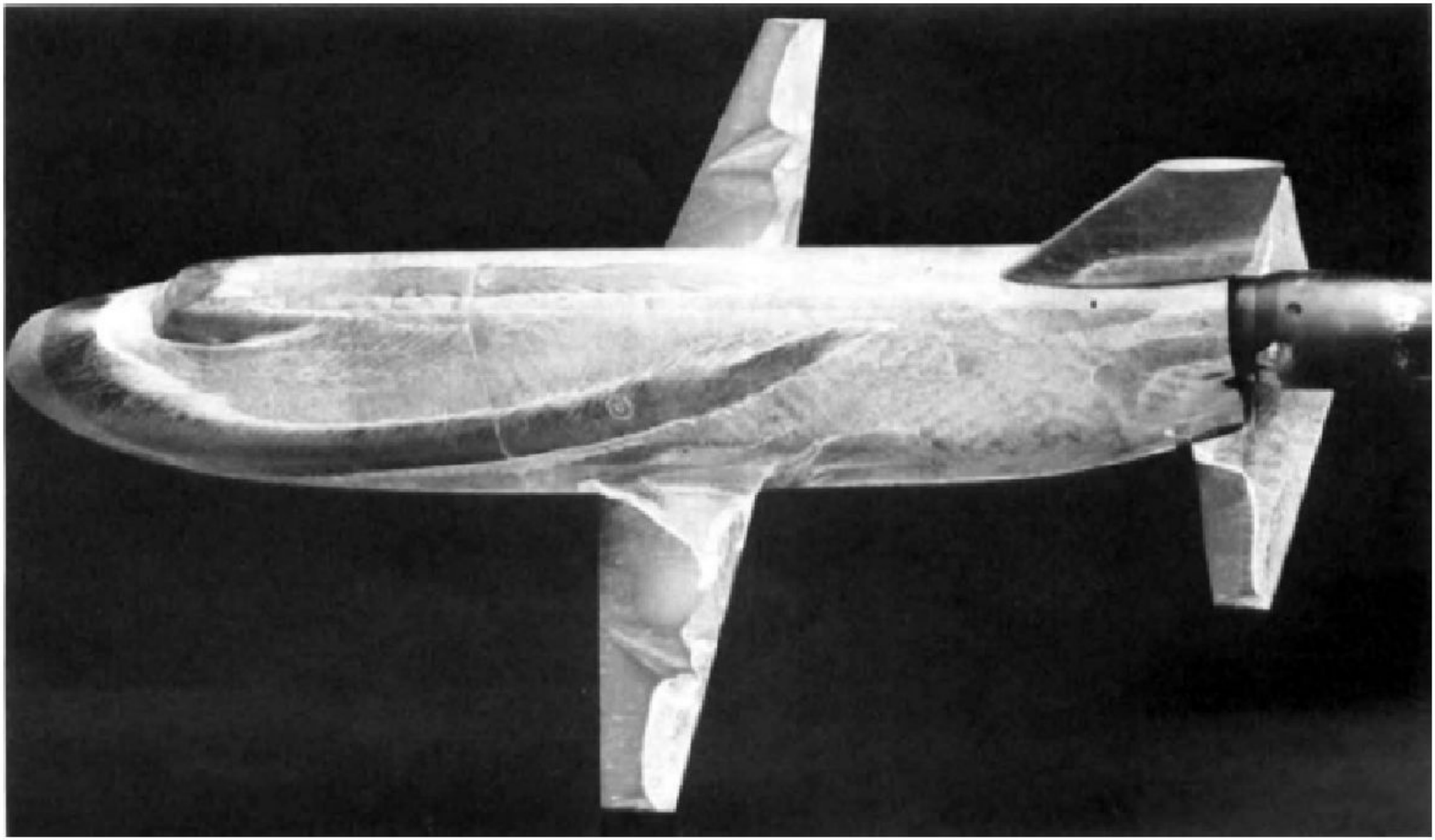
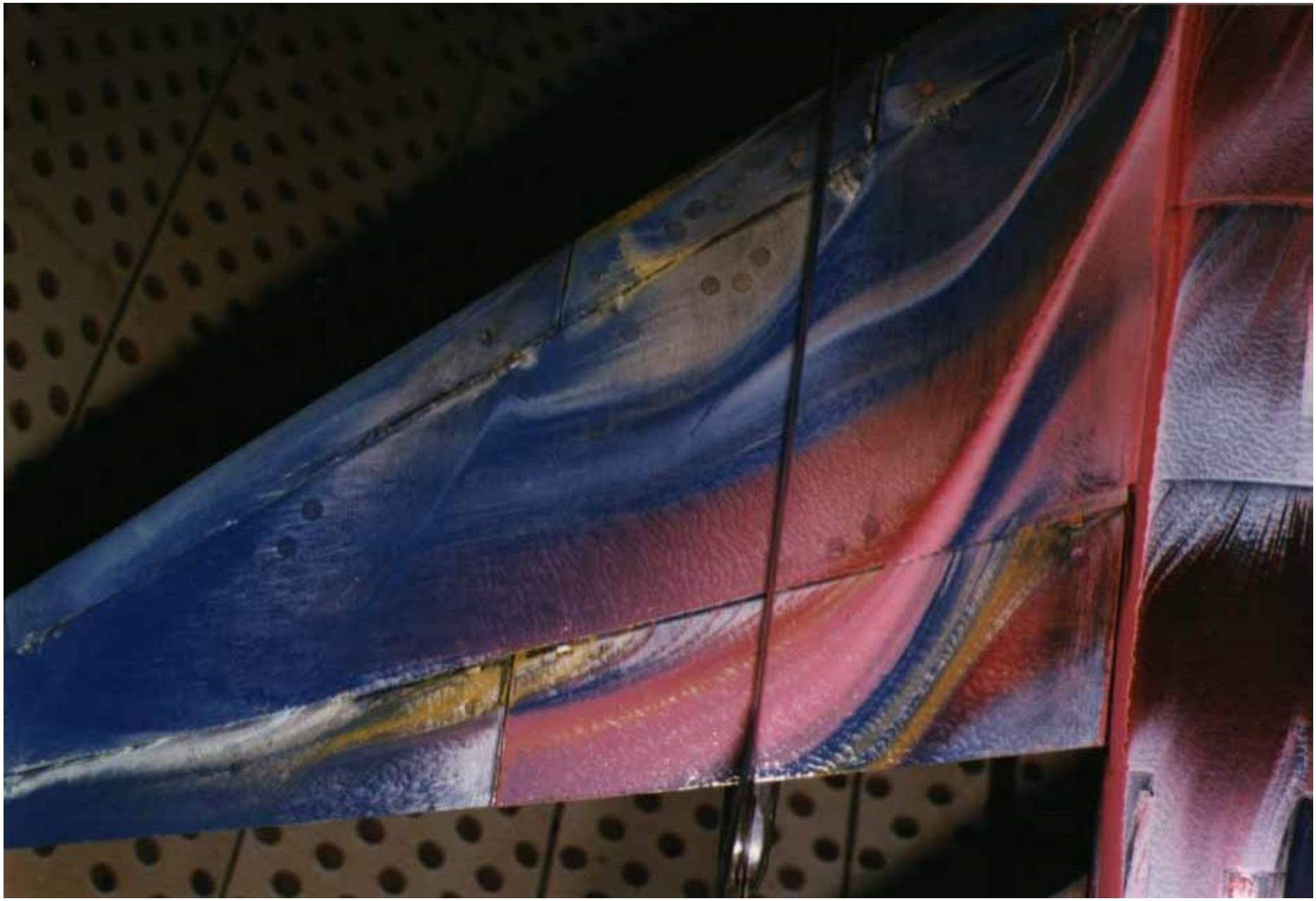


Fig. 2.45 Oil flow pattern on orbiter model. (Courtesy of L. H. Seegmiller, NASA Ames Research Center.)



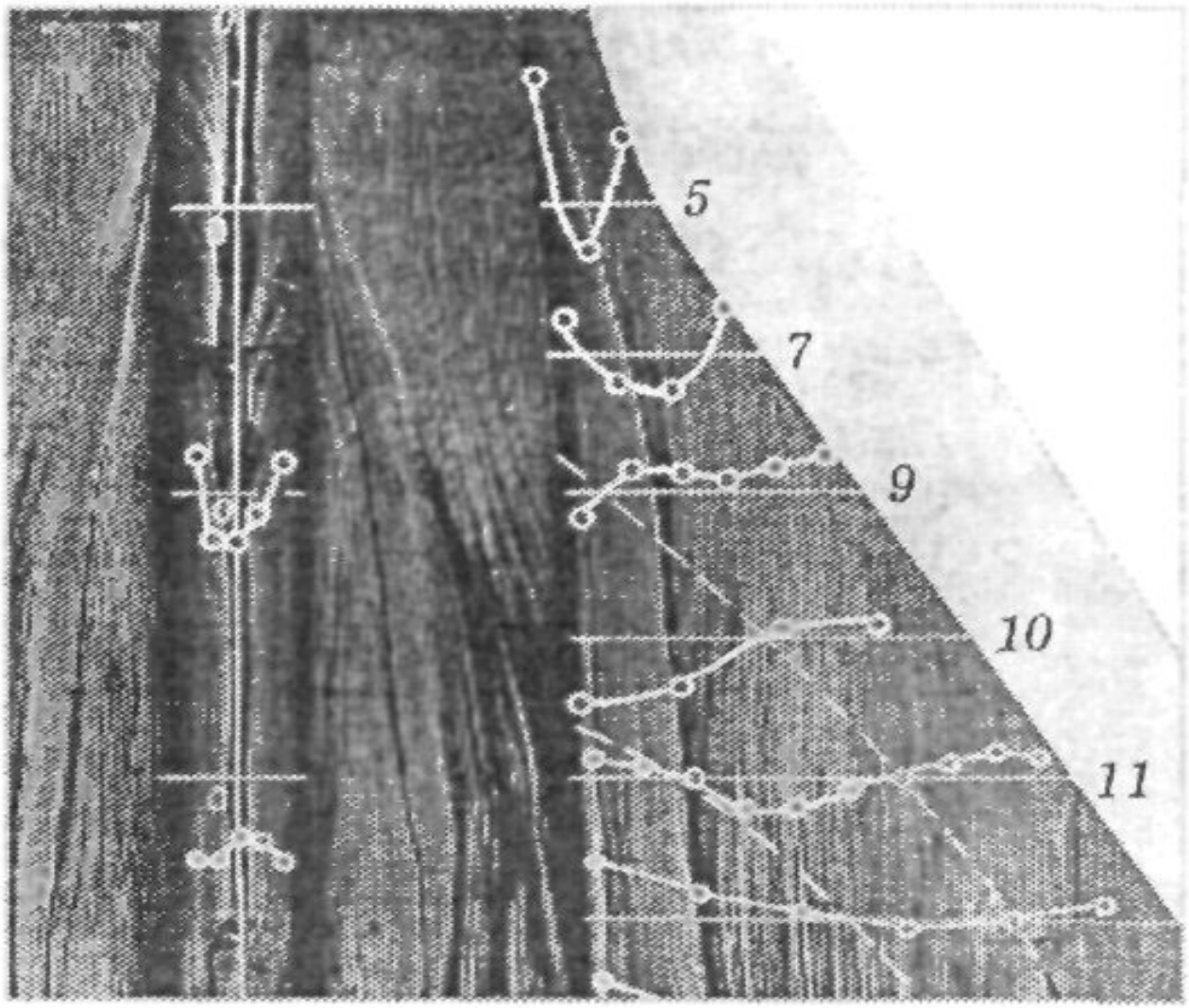


Рис. 6.11. Маслосажевая картина обтекания модели СПС

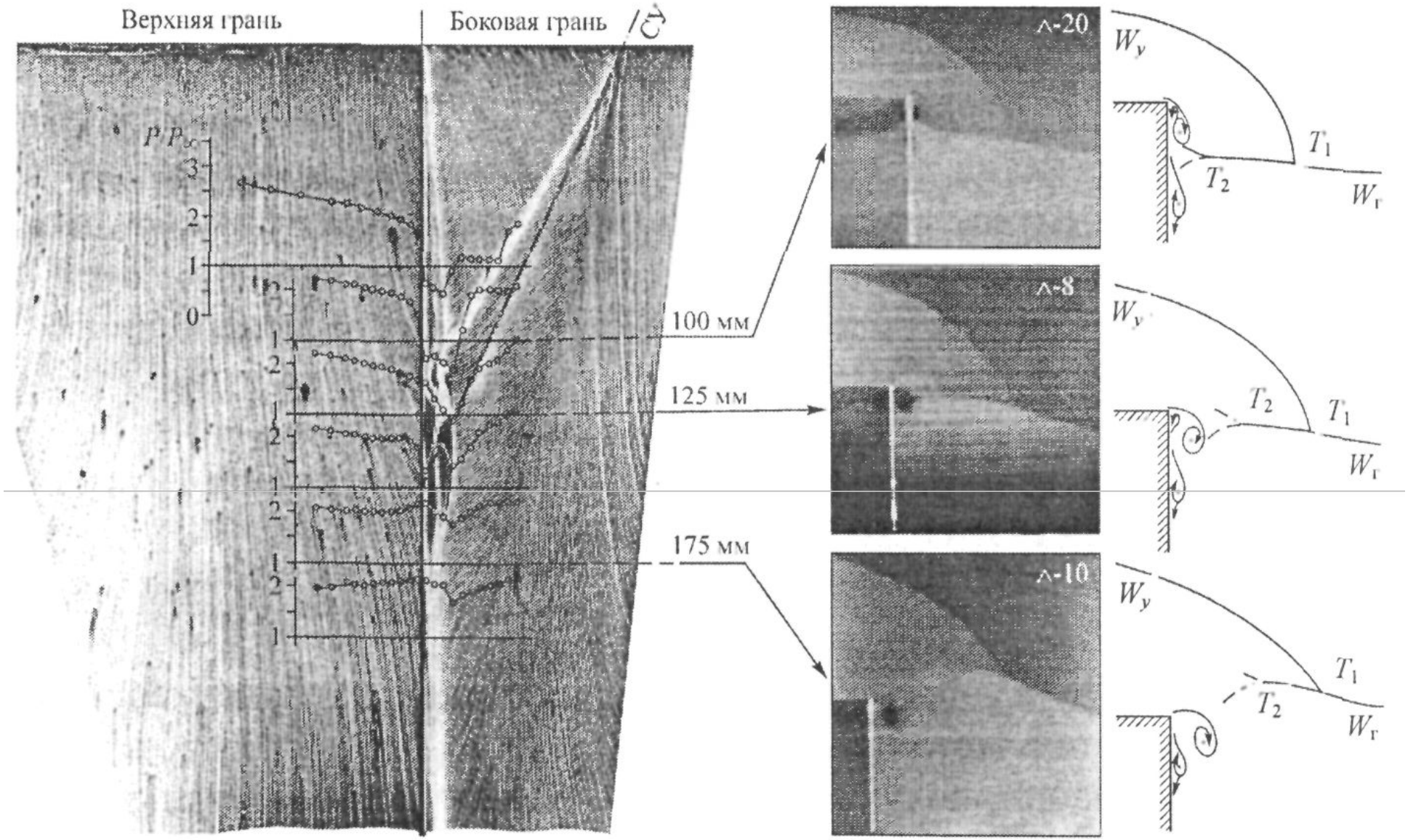


Рис. 6.12. Поверхностные линии тока, распределения давлений и вихреобразование при продольном обтекании внешнего прямого угла

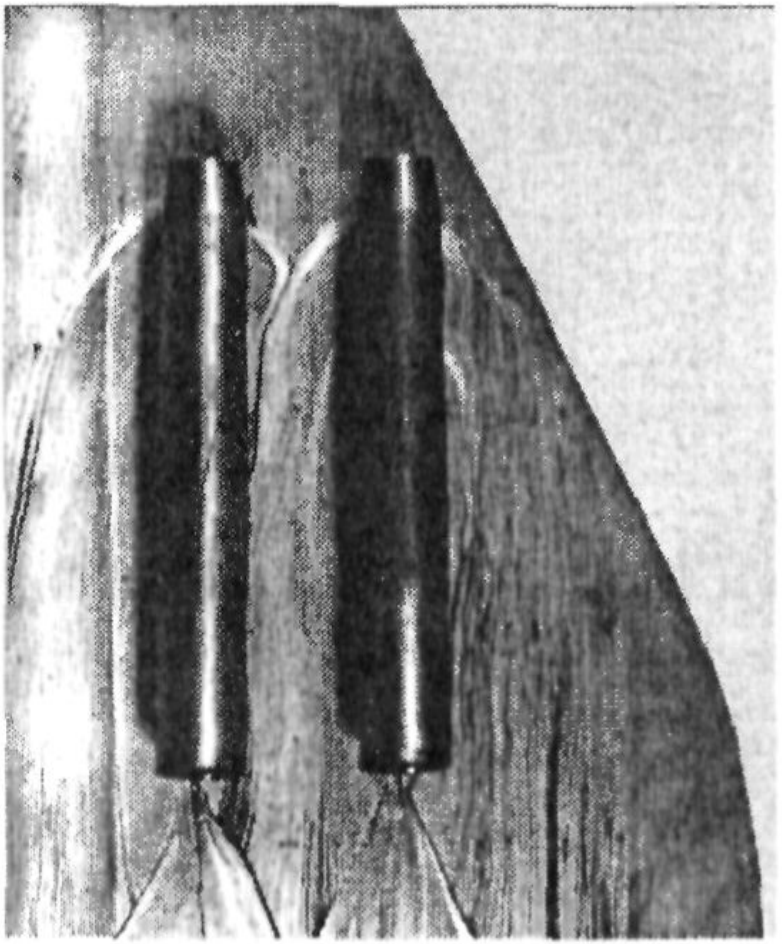


Рис. 6.13. Картина сверхзвукового течения на поверхности крыла с мотогондолами

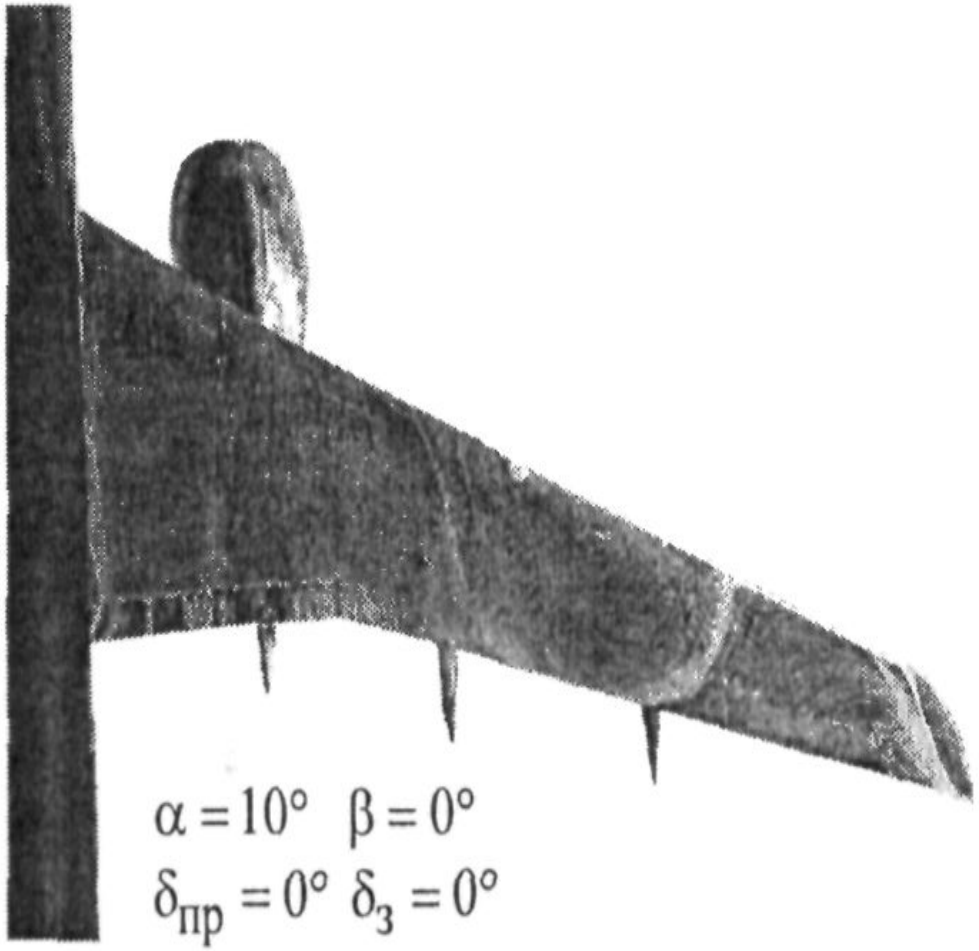


Рис. 6.14. Картина маслосажевой визуализации дозвукового обтекания полумодели самолёта

Метод каолина

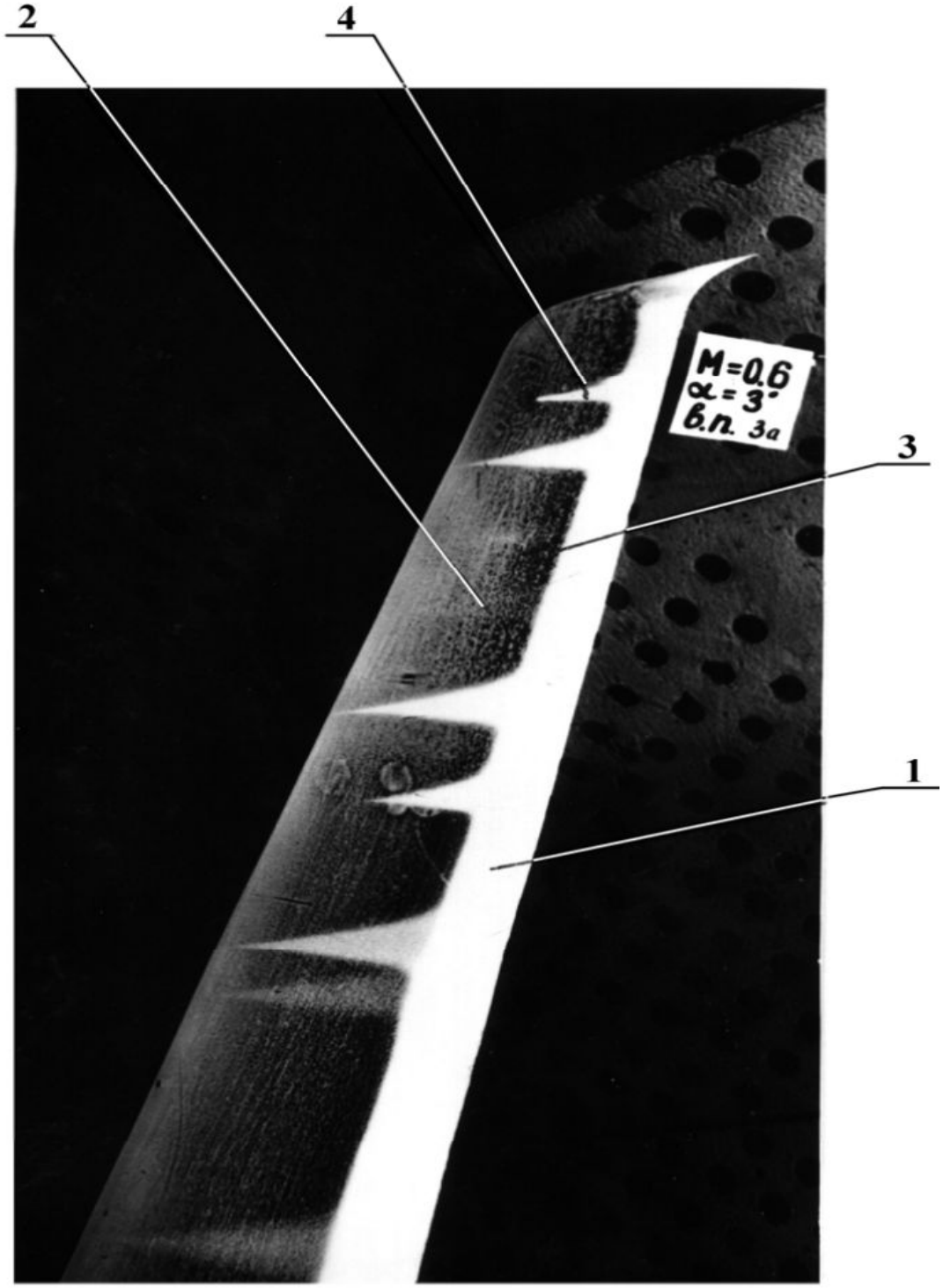
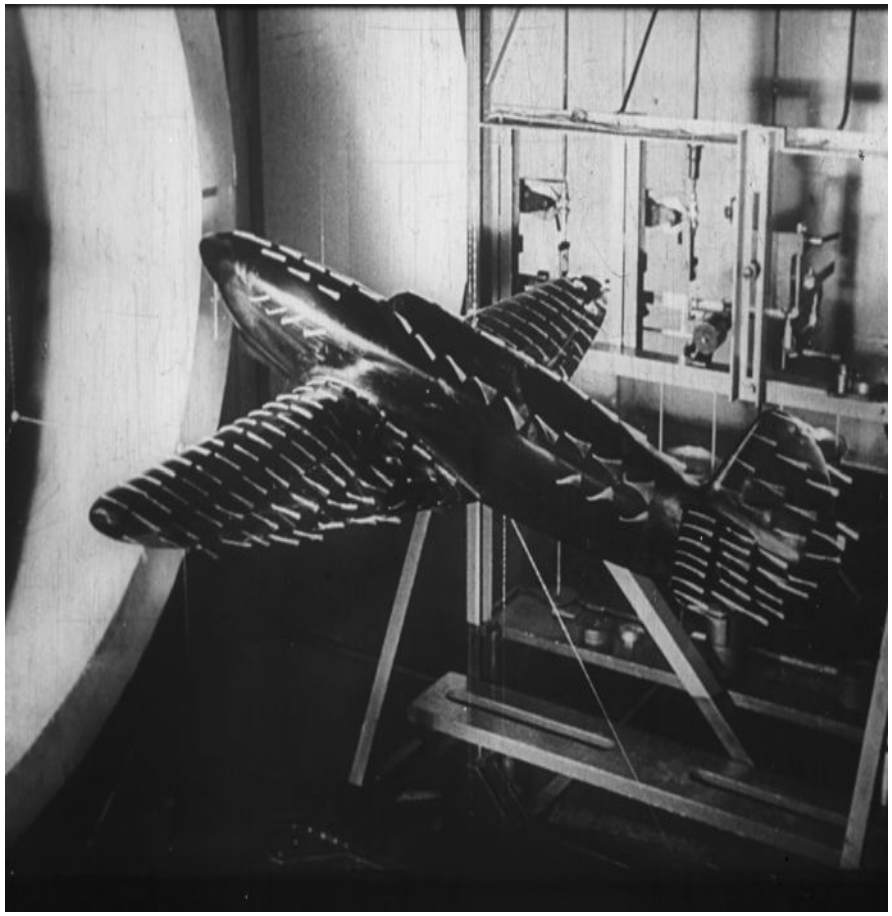


Рис. 17 Предельные линии тока, V=50*м/с*, $\alpha=10^0$

Метод шелковинок



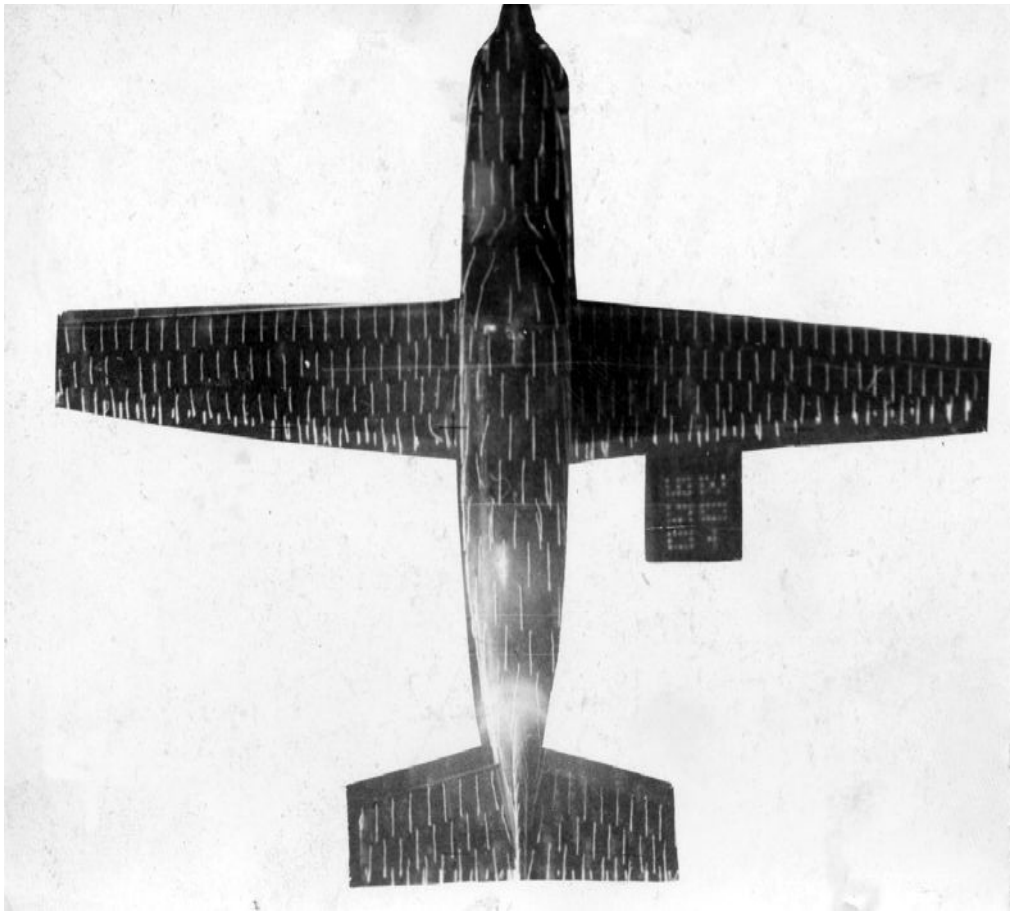
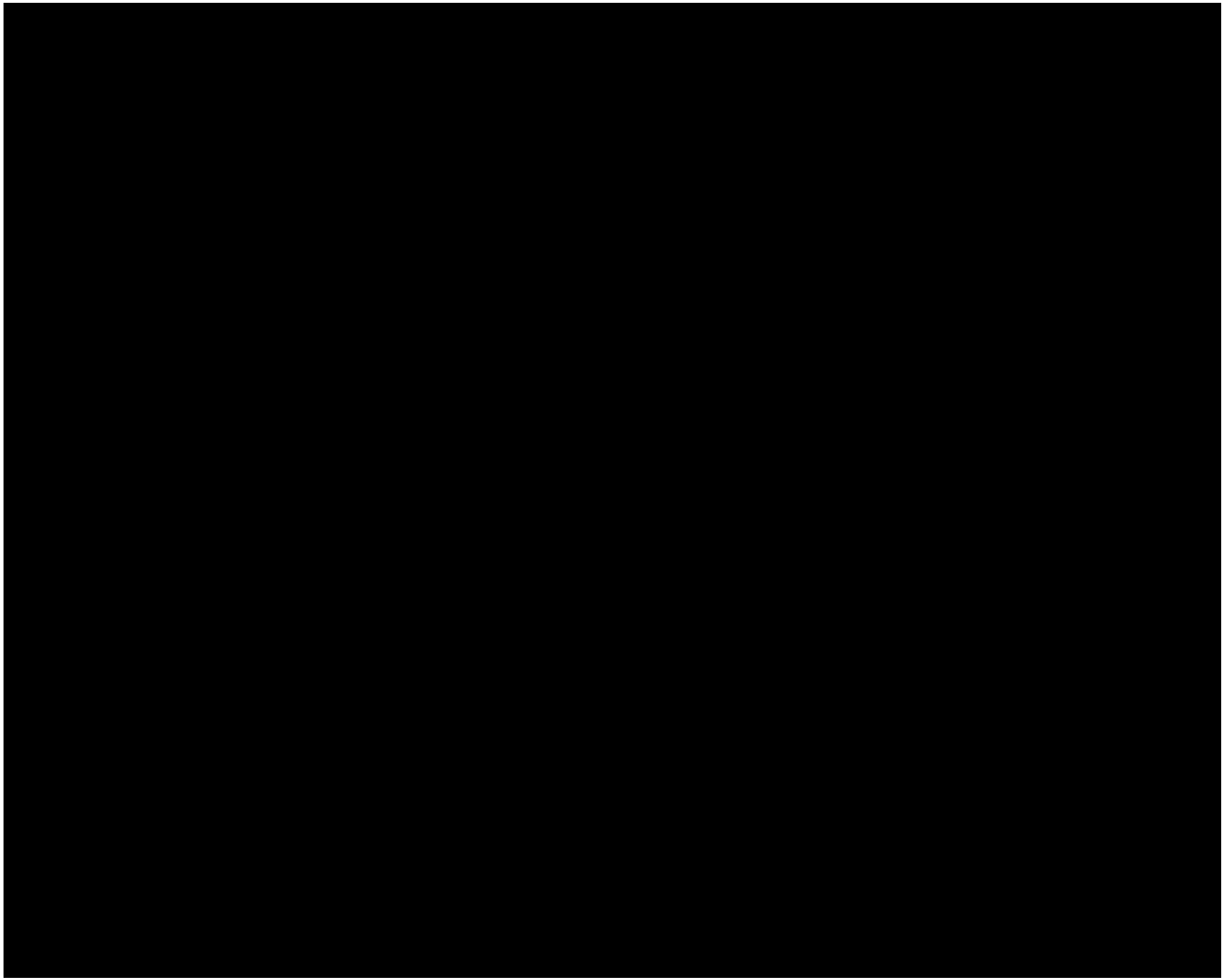
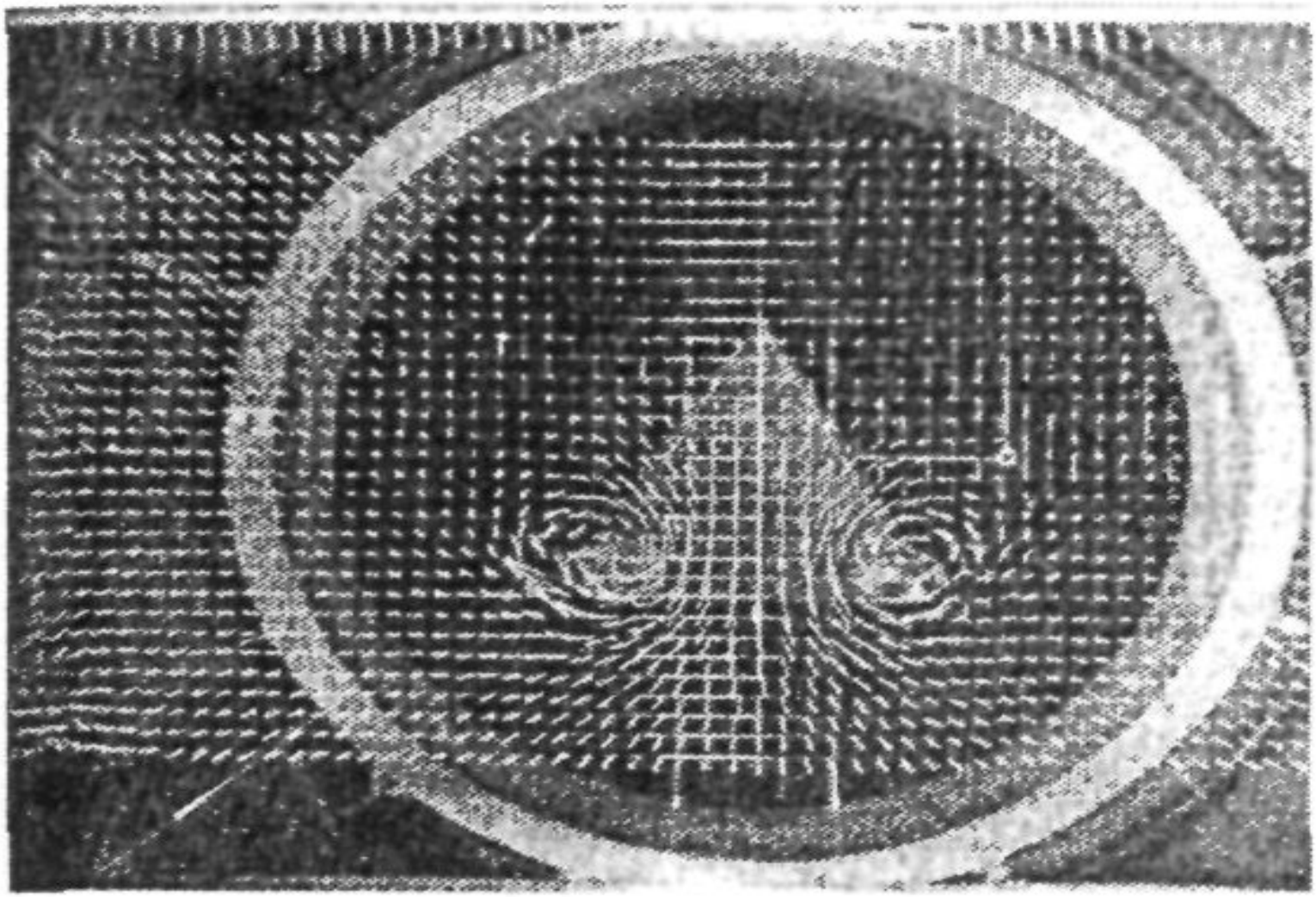


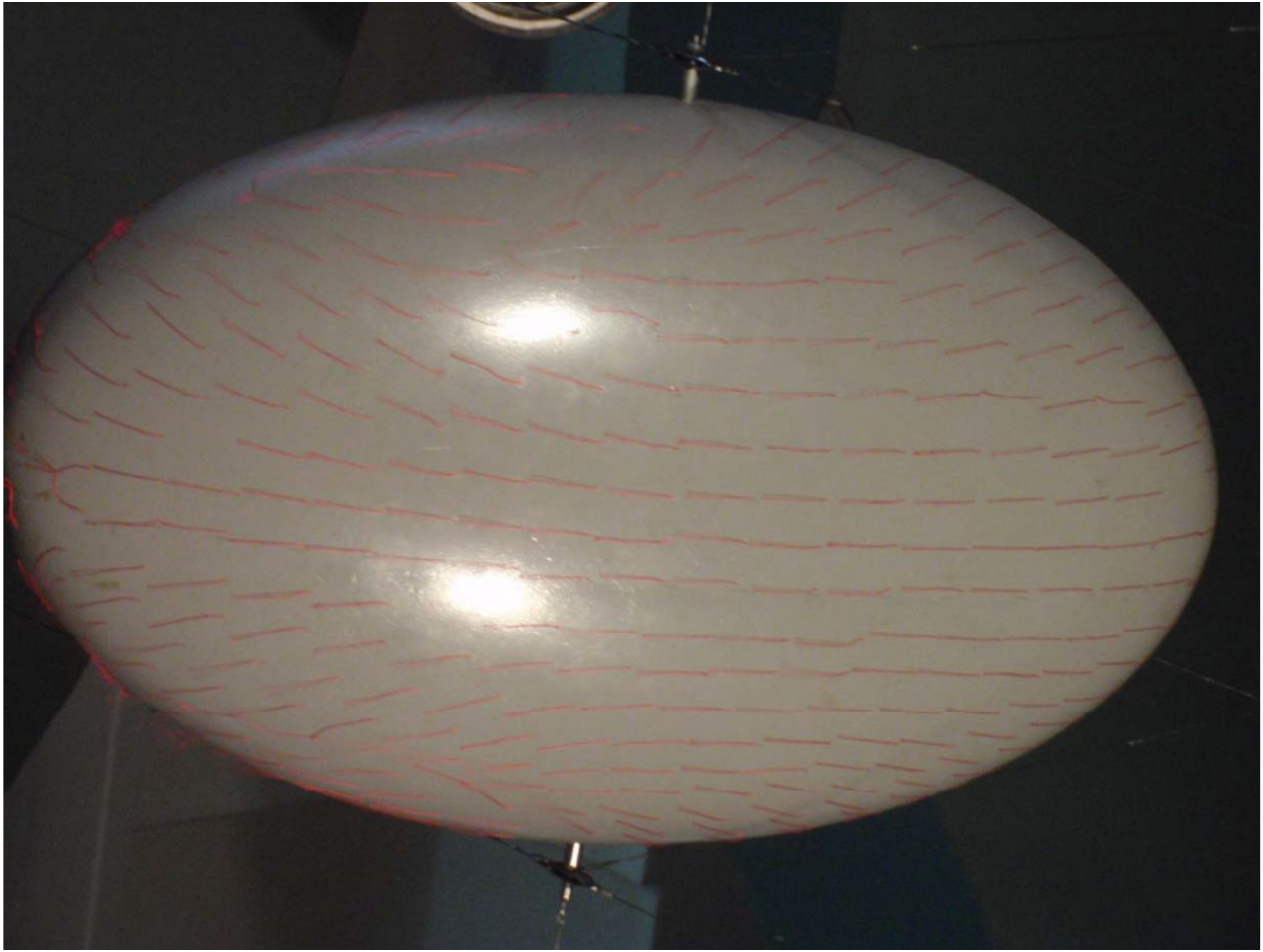
Рис 10

Визуализация методом шелковинок в АДТ Т-1 МАИ





Вихревые образования на задней кромке крыла под углом атаки [163]



α = 30°

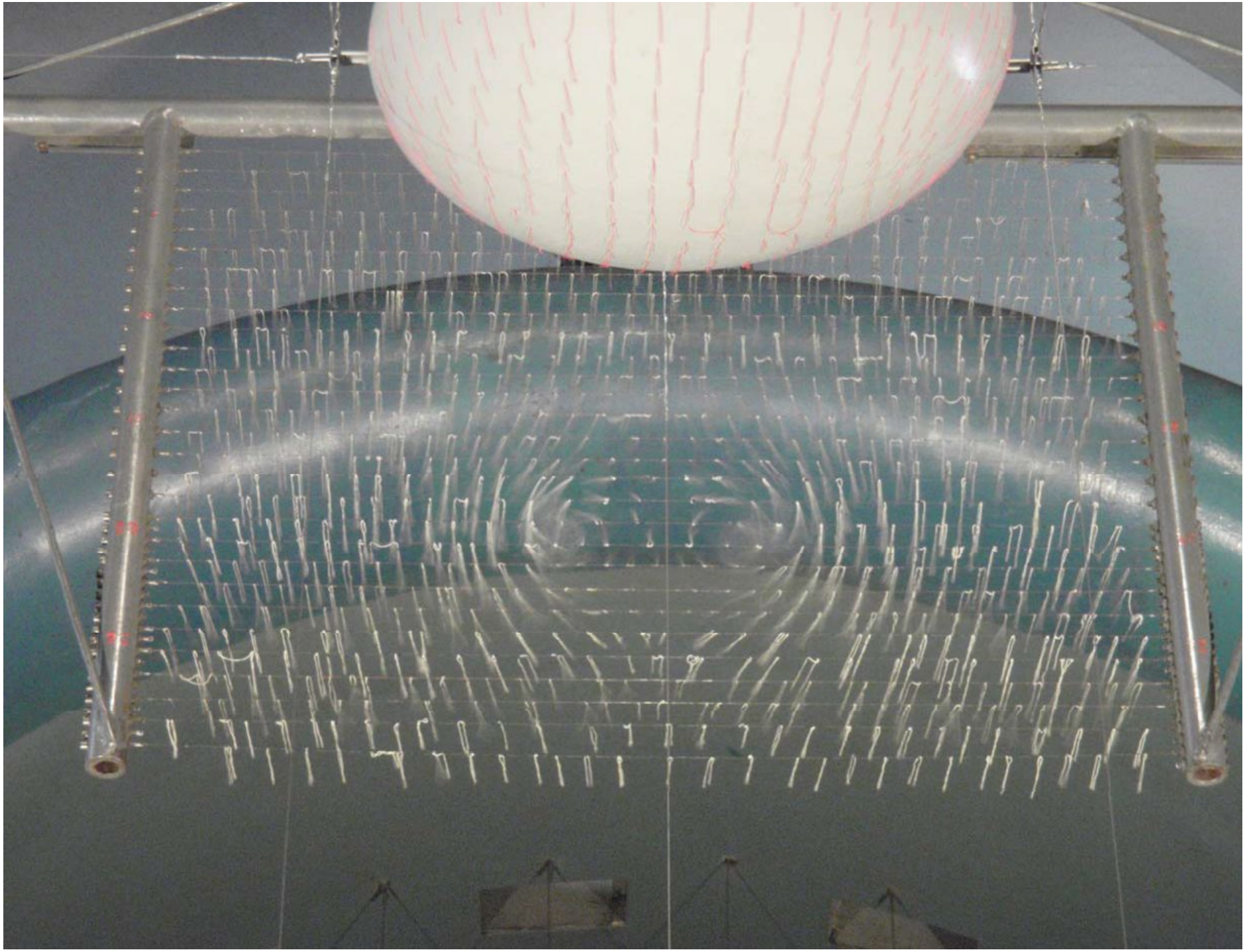


Рис. 3.32 $x_{экр}$ = 720 мм

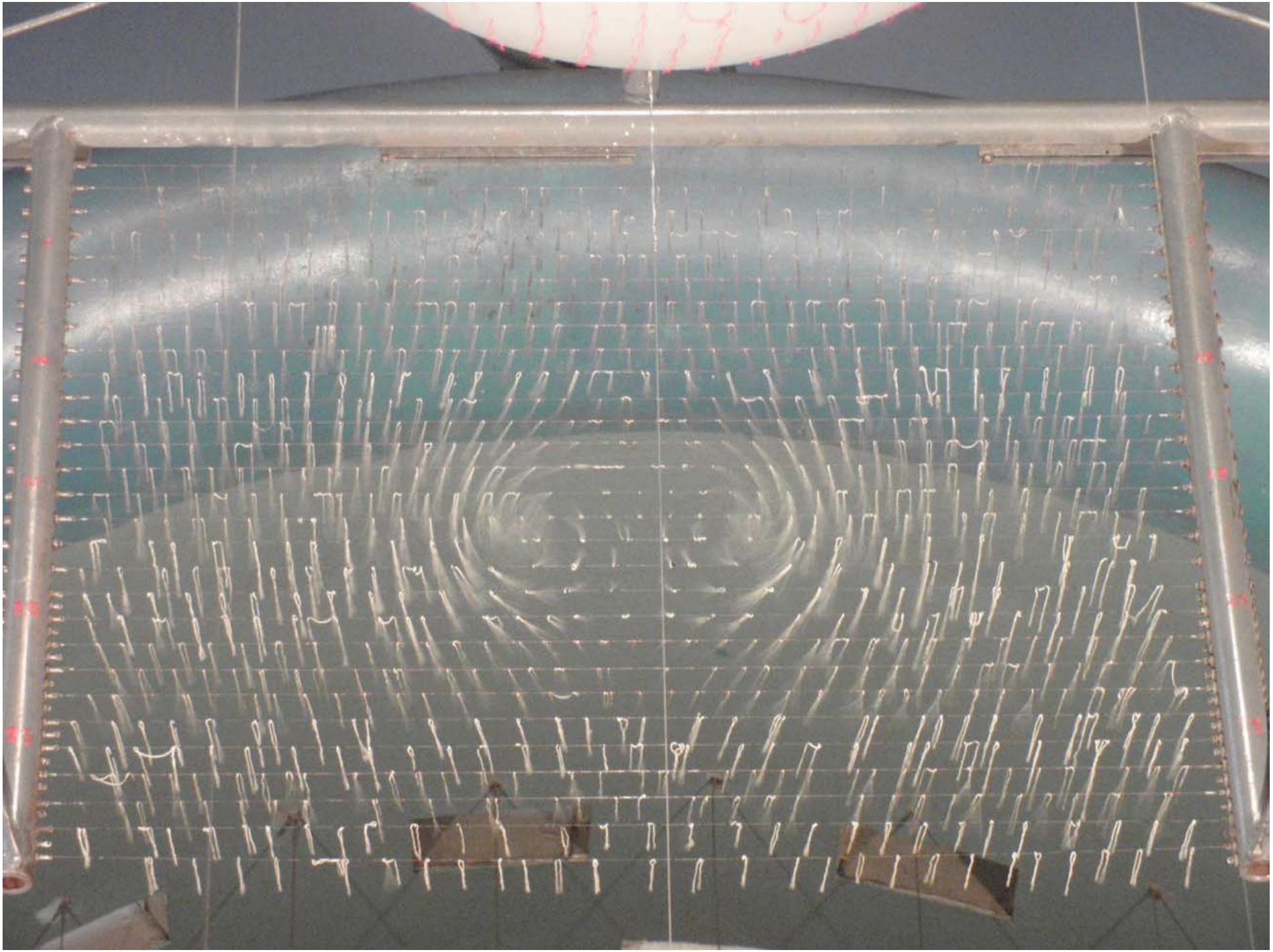


Рис. 3.33 $x_{экр}$ = 970 мм

Рис. 11

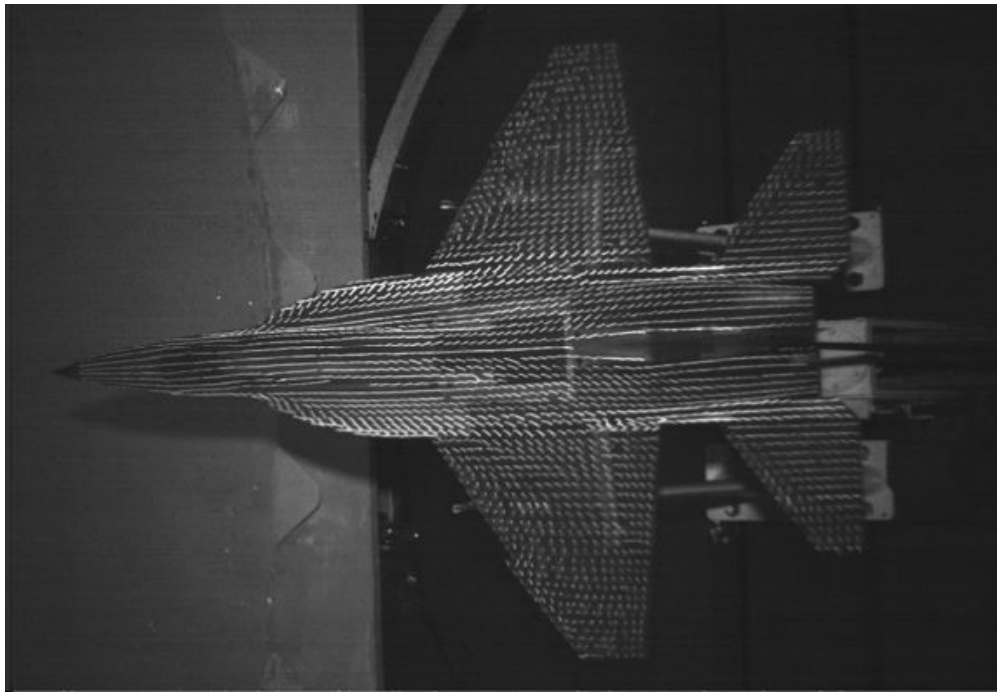


Рис. 12

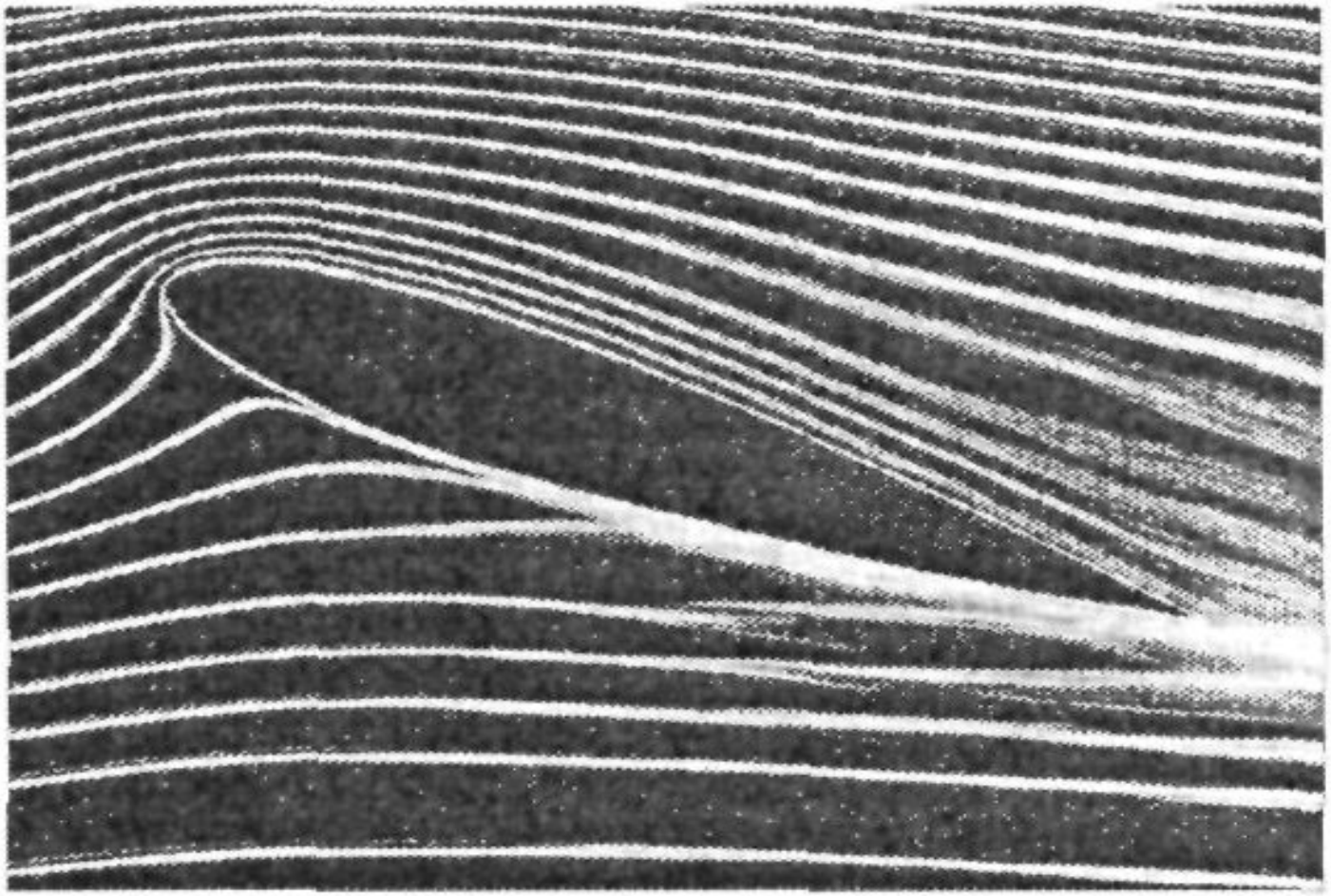


Рис. 6.6. Дымовые линии тока при обтекании модели крыла в аэродинамической трубе [163]

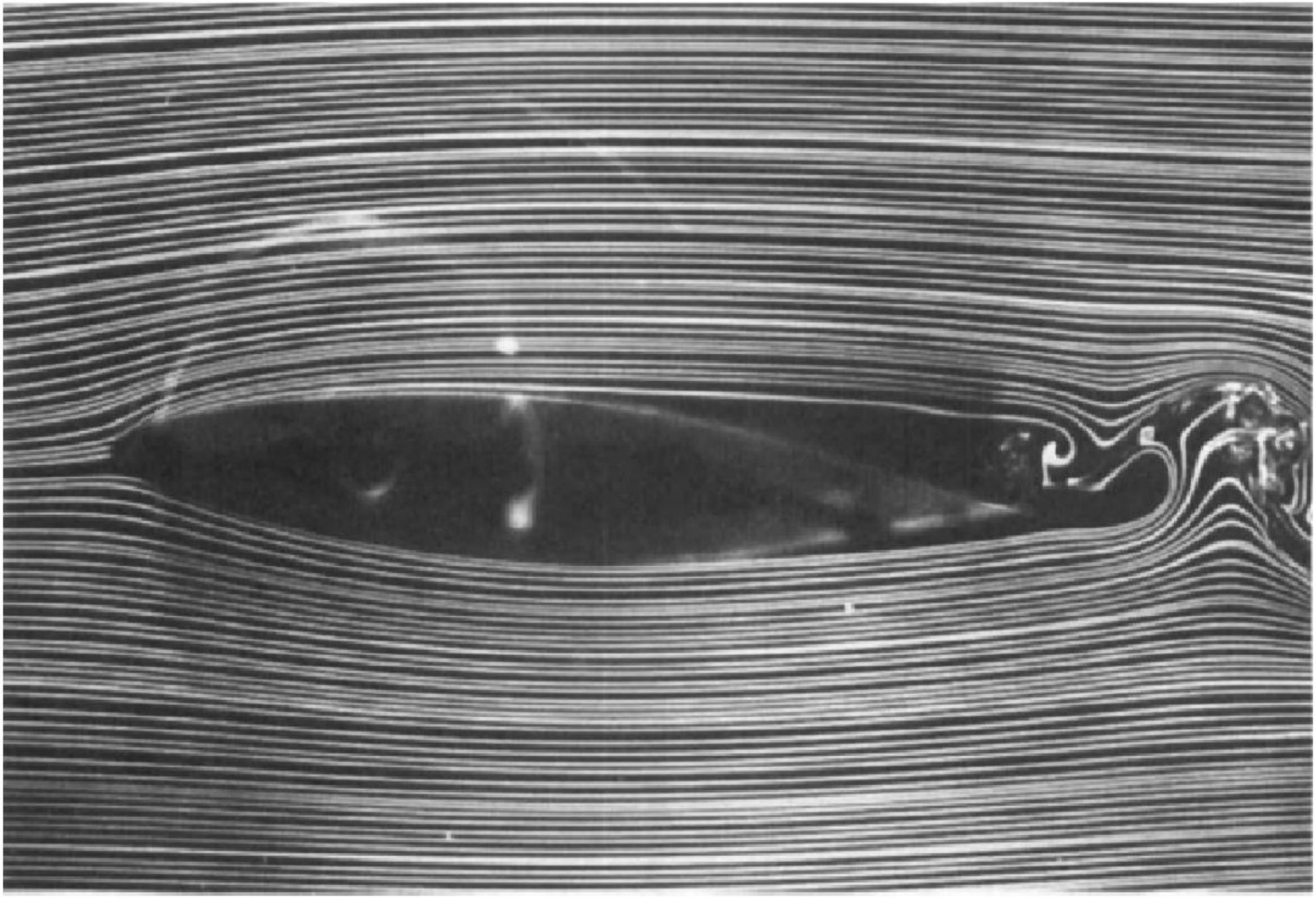


Fig. 2.11 Smoke lines around an airfoil in low Reynolds number wind-tunnel flow. (From Mueller and Batill, 1981.)

Fig. 2.13 Smoke lines around a road vehicle in a full-scale wind tunnel. (Courtesy of Volkswagenwerk AG.)

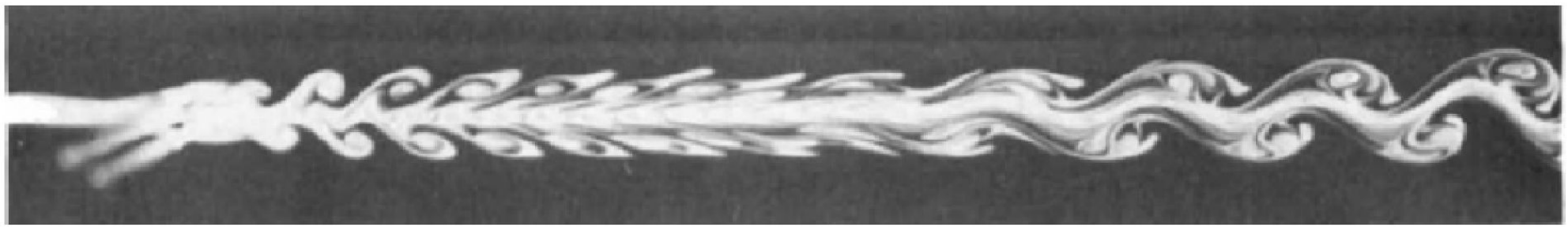


Fig. 2.14 Vortex systems in the wake of a group of three cylinders. Smoke photograph taken at a Reynolds number Re ≅ 100. (From Zdravkovich, 1968.)

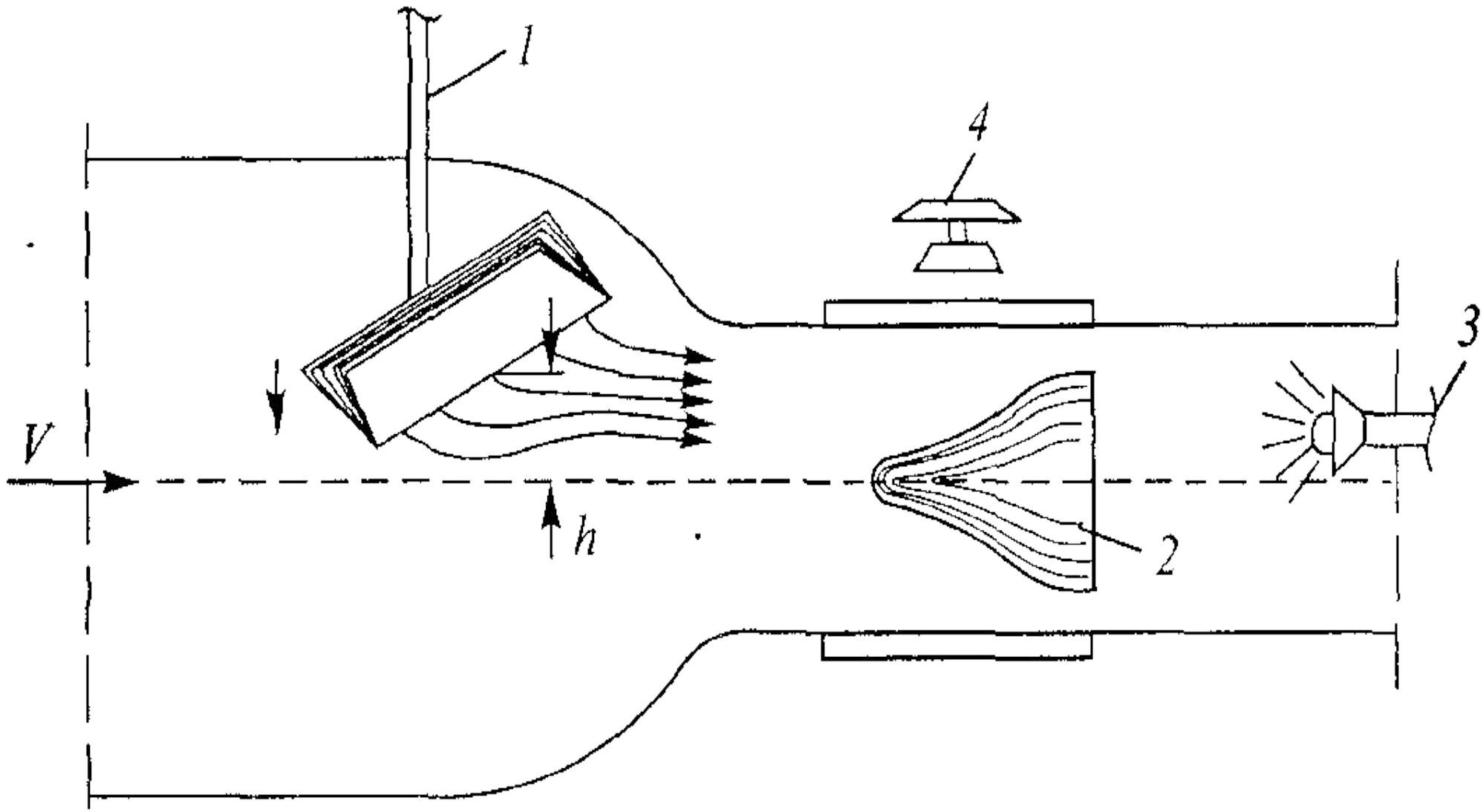


Рис. 6.7. Схема метода дымящейся проволочки

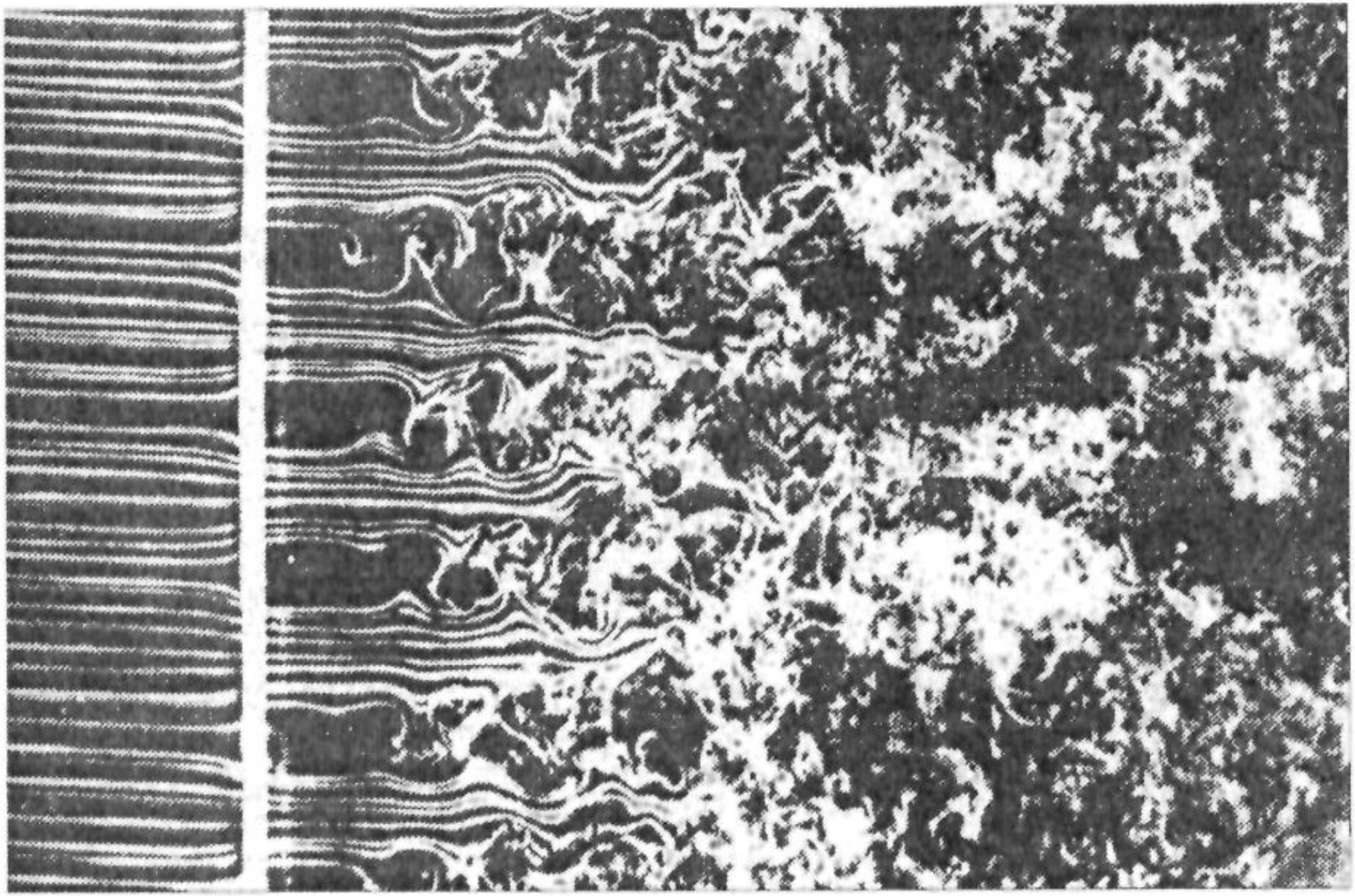


Рис. 6.8. Визуализация прохождения ламинарного потока через дымящуюся решётку [166]

Метод стробоскопической визуализации

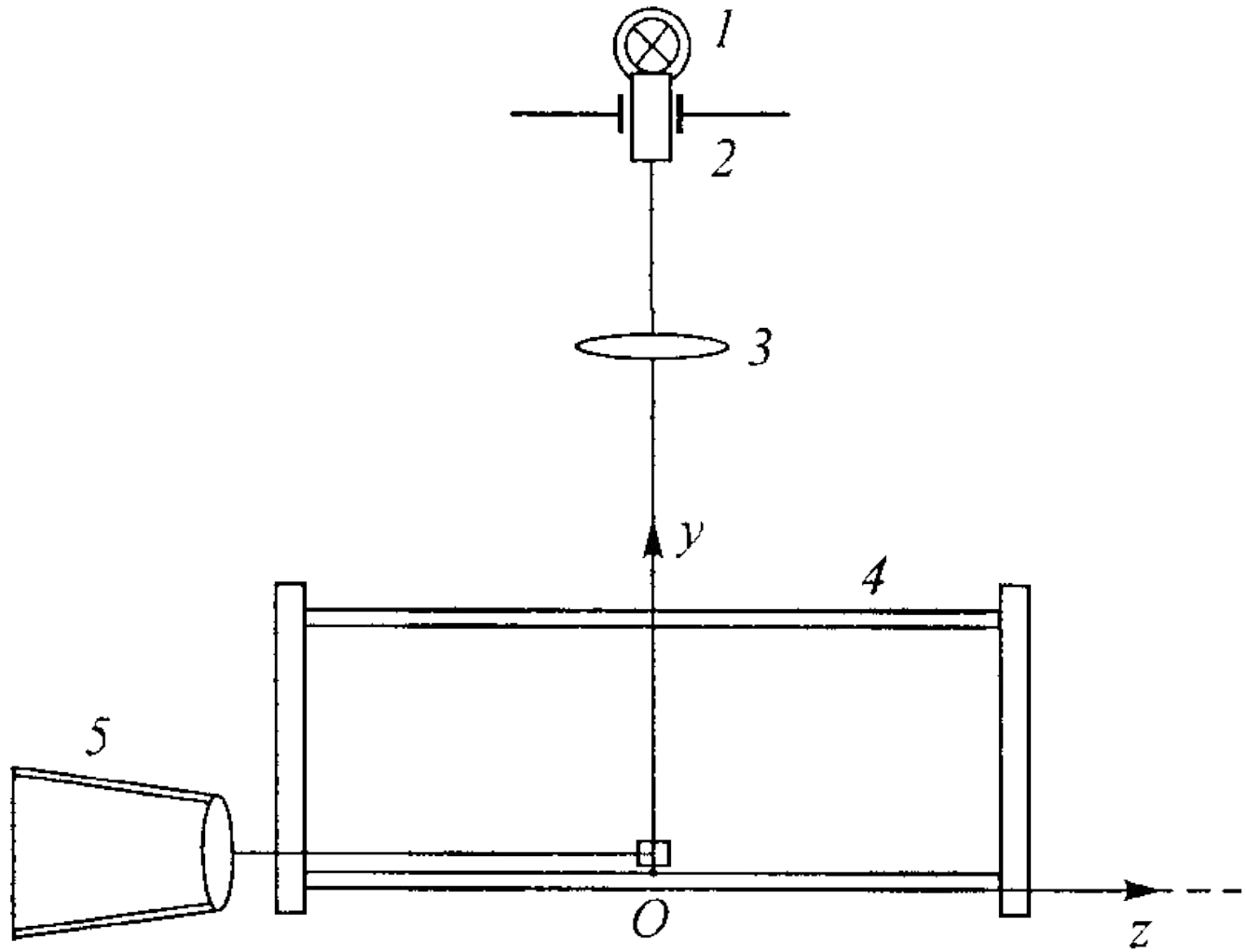


Рис. 6 15. Оптическая схема метода стробоскопической визуализации течений:

1 – импульсный источник света, *2* – щель, *3* – объектив, *4* – рабочий участок, *5* – фотоаппарат

PIV метод

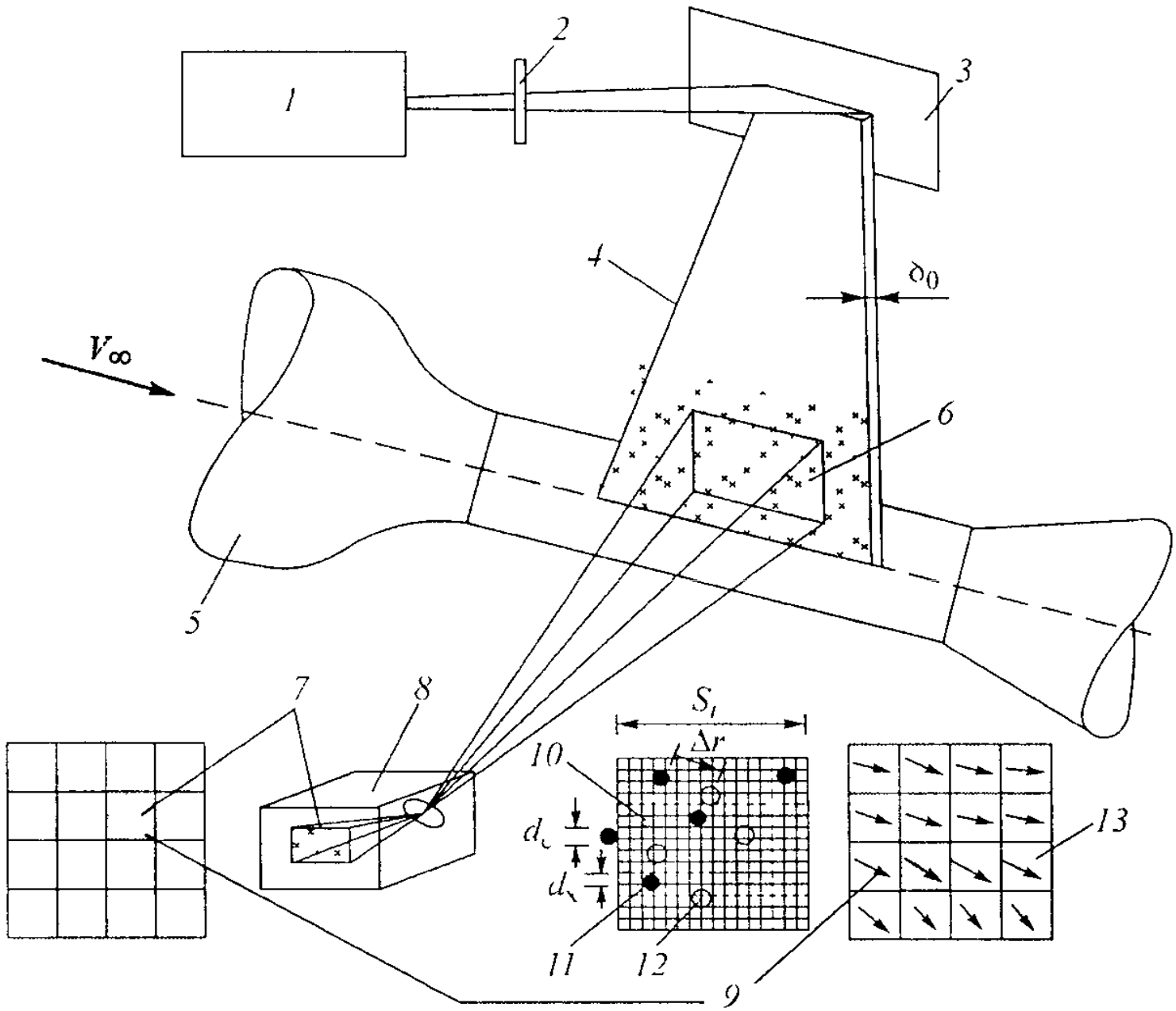


Рис 6 16. Иллюстрация принципа действия метода визуализации полей скорости по изображениям движущихся частиц

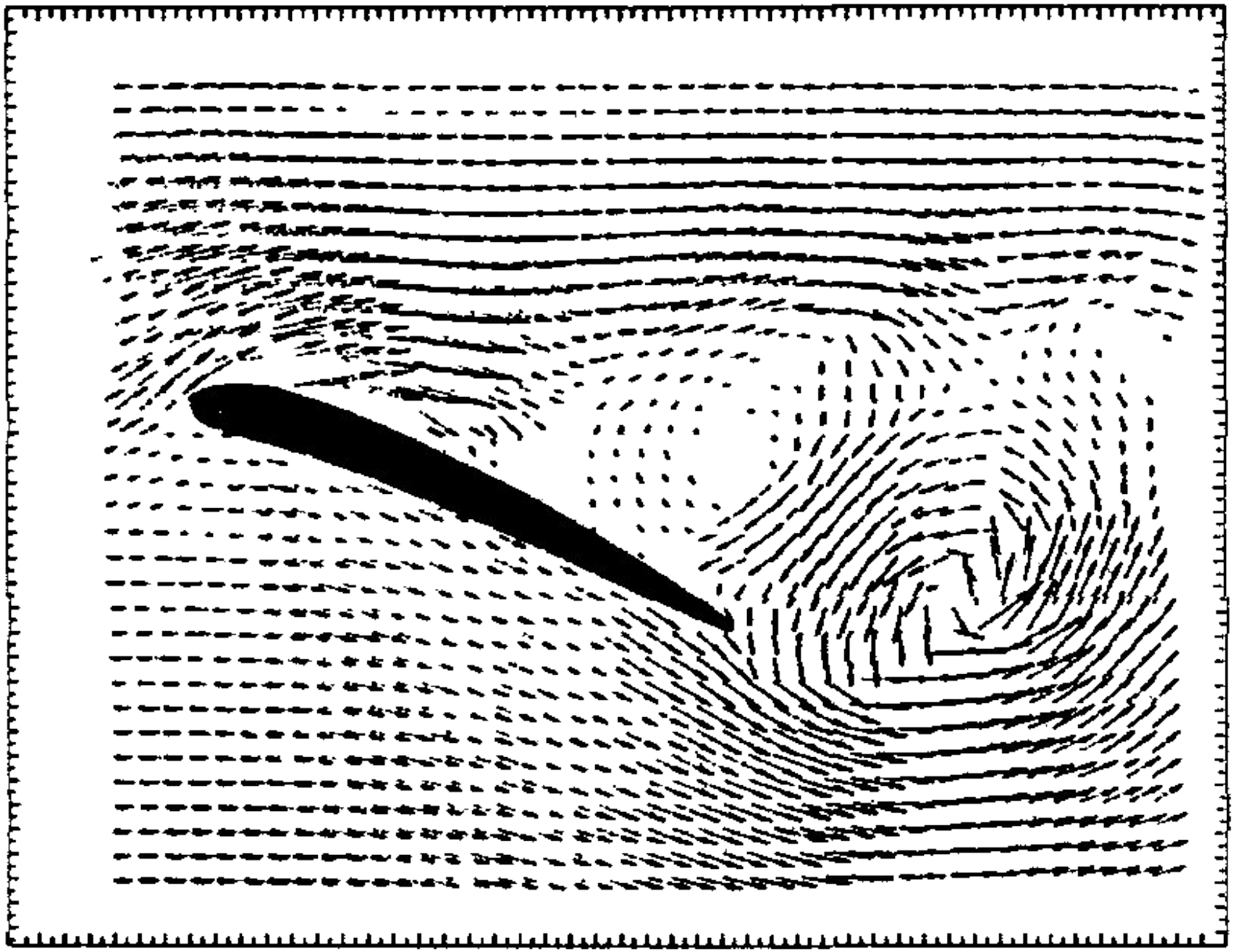


Рис. 6. 17. Пример распределения мгновенных векторов скорости

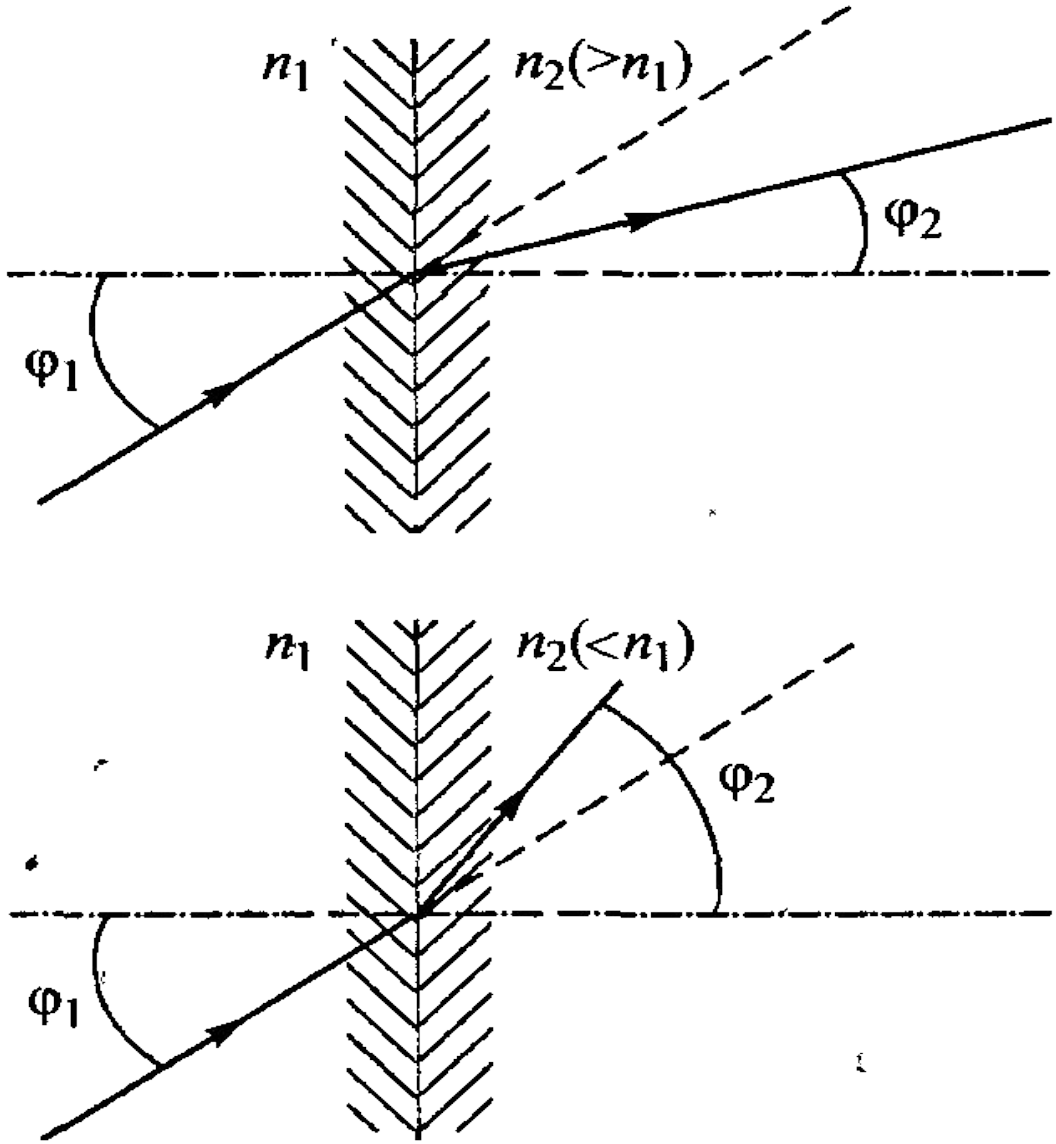


Рис. 6.18. Преломления пучка света, пересекающего границу раздела двух сред

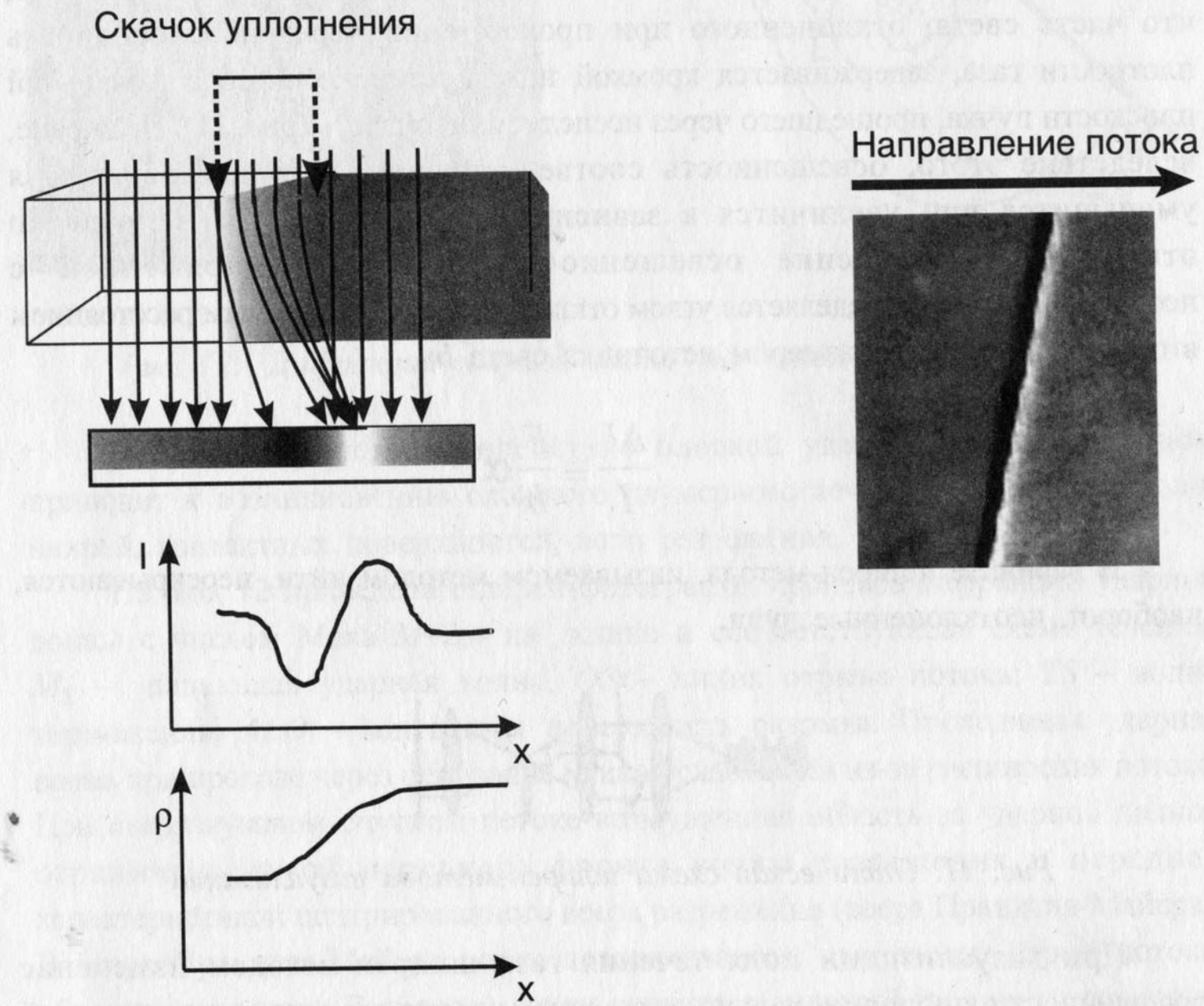


Рис. 10. Схема теневого метода. Теневое изображение скачка уплотнения

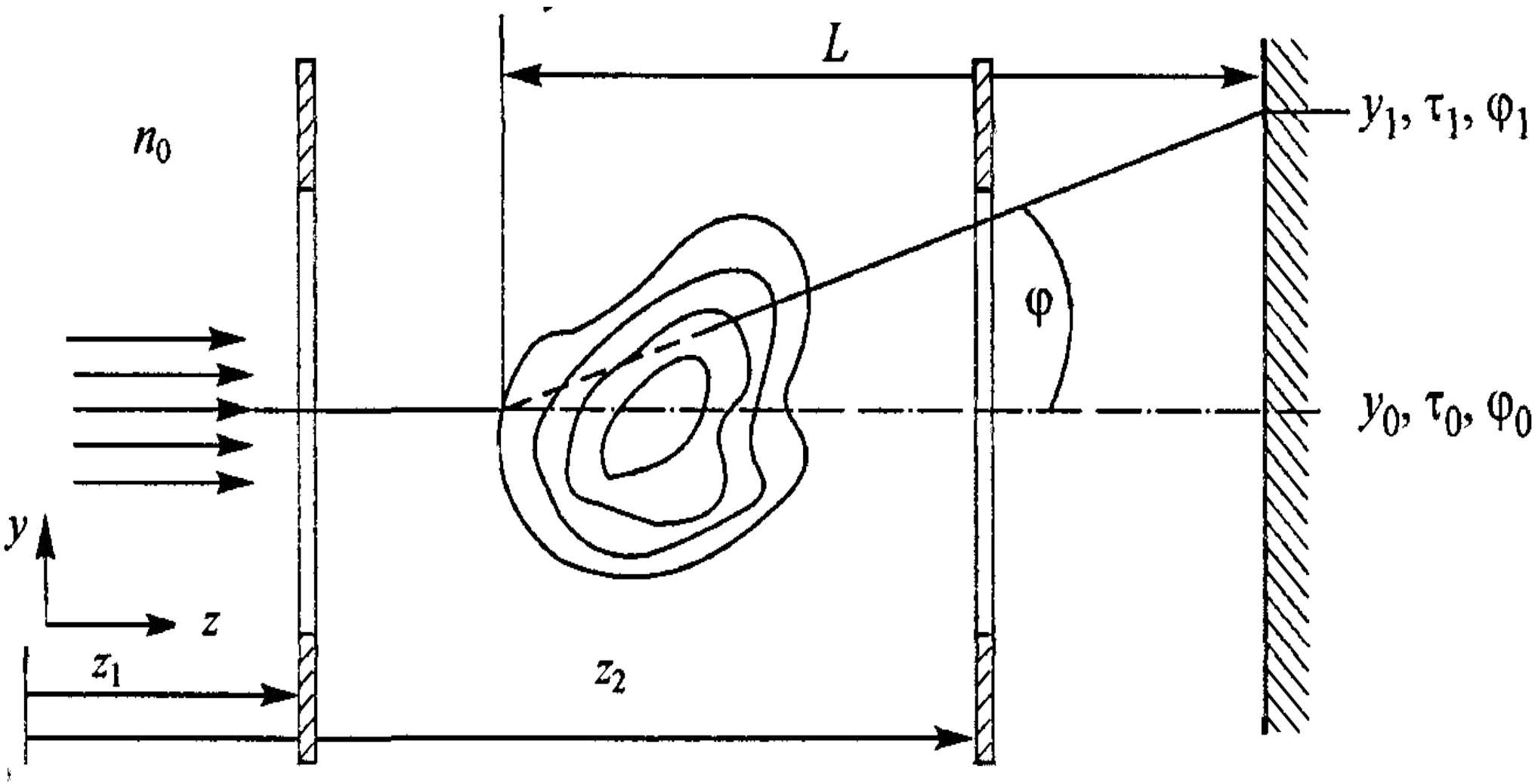


Рис. 6.19. Прохождение светового потока через исследуемую неоднородность

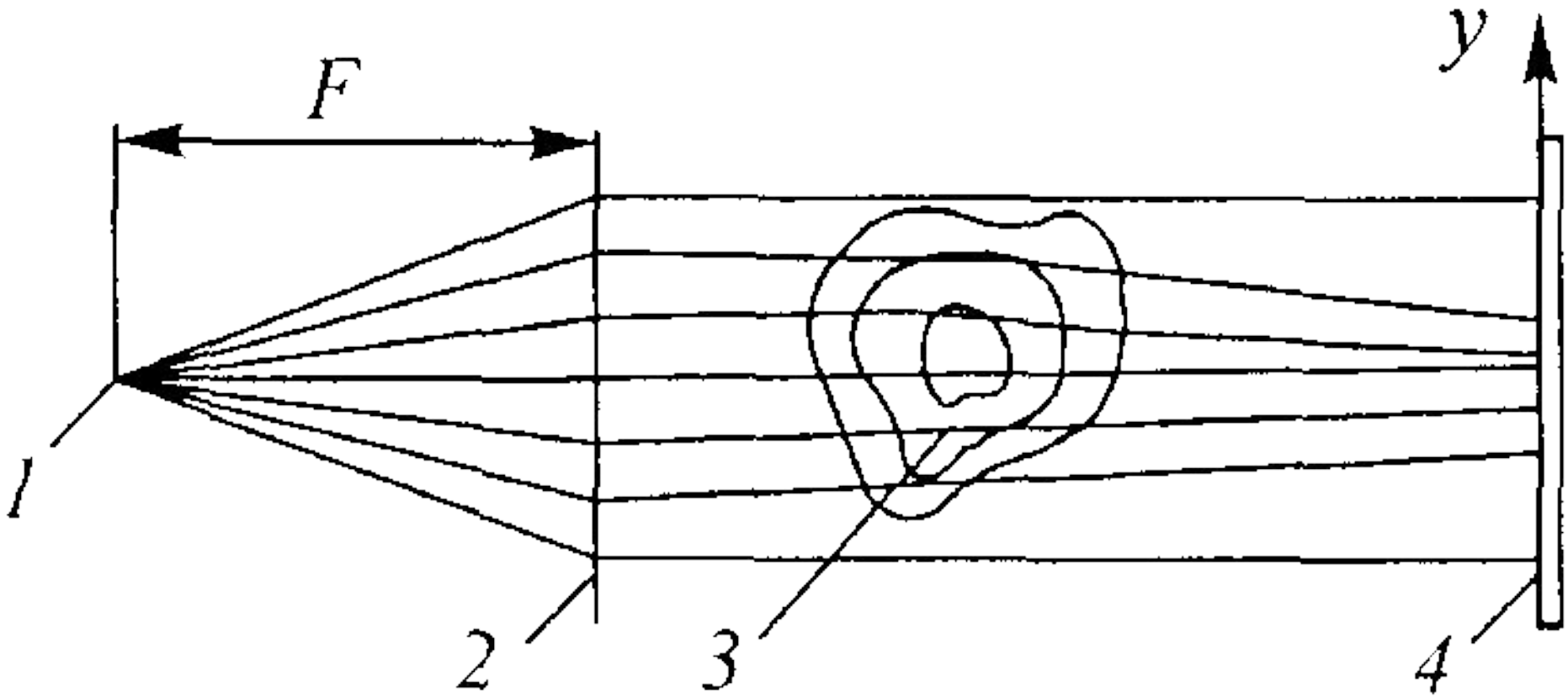


Рис 6 20 Принципиальная схема прямотеневого метода

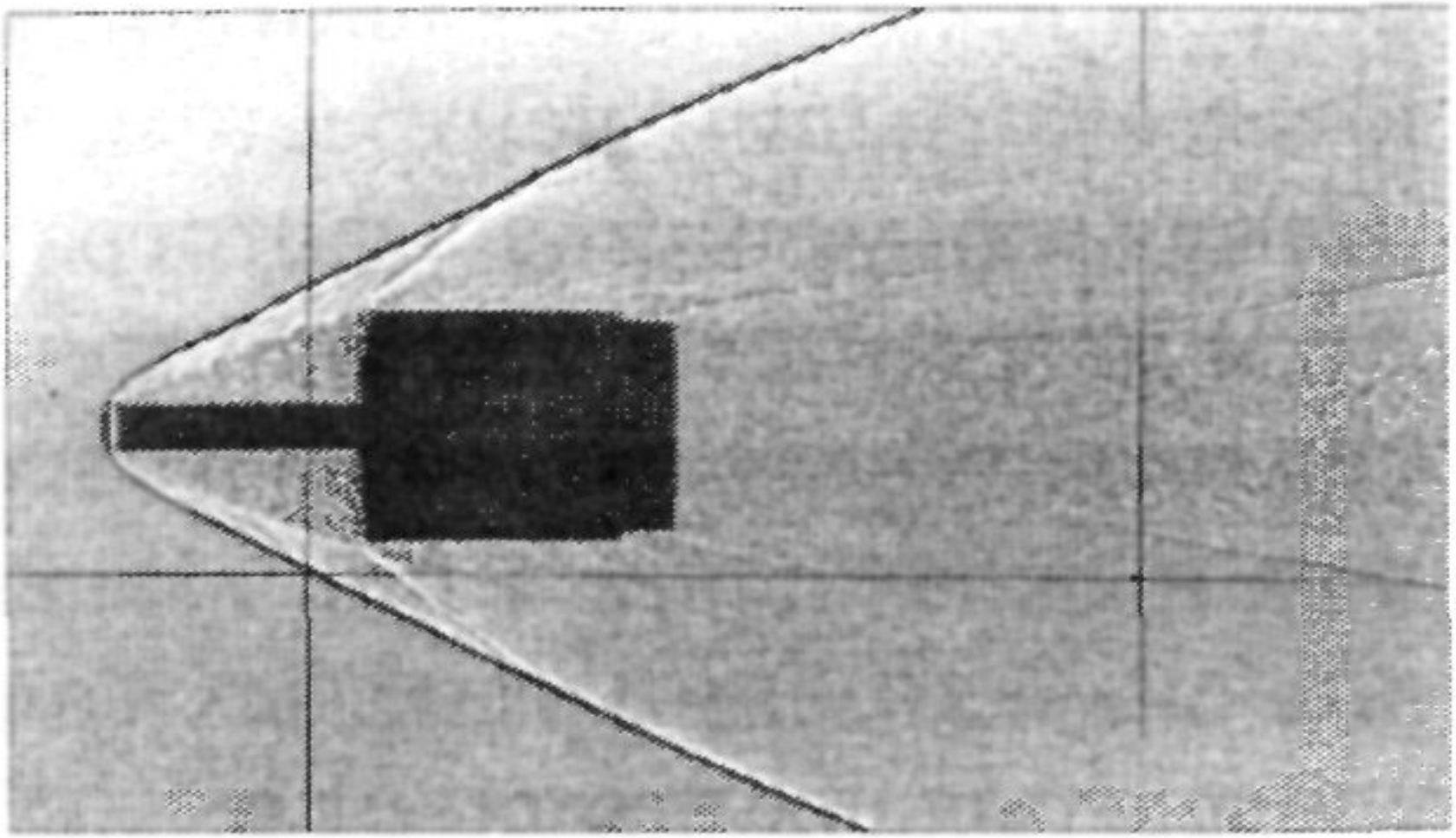


Рис. 6.21. Иллюстрация прямотеневого метода на примере обтекания цилиндра с иглой при $M_\infty = 3$

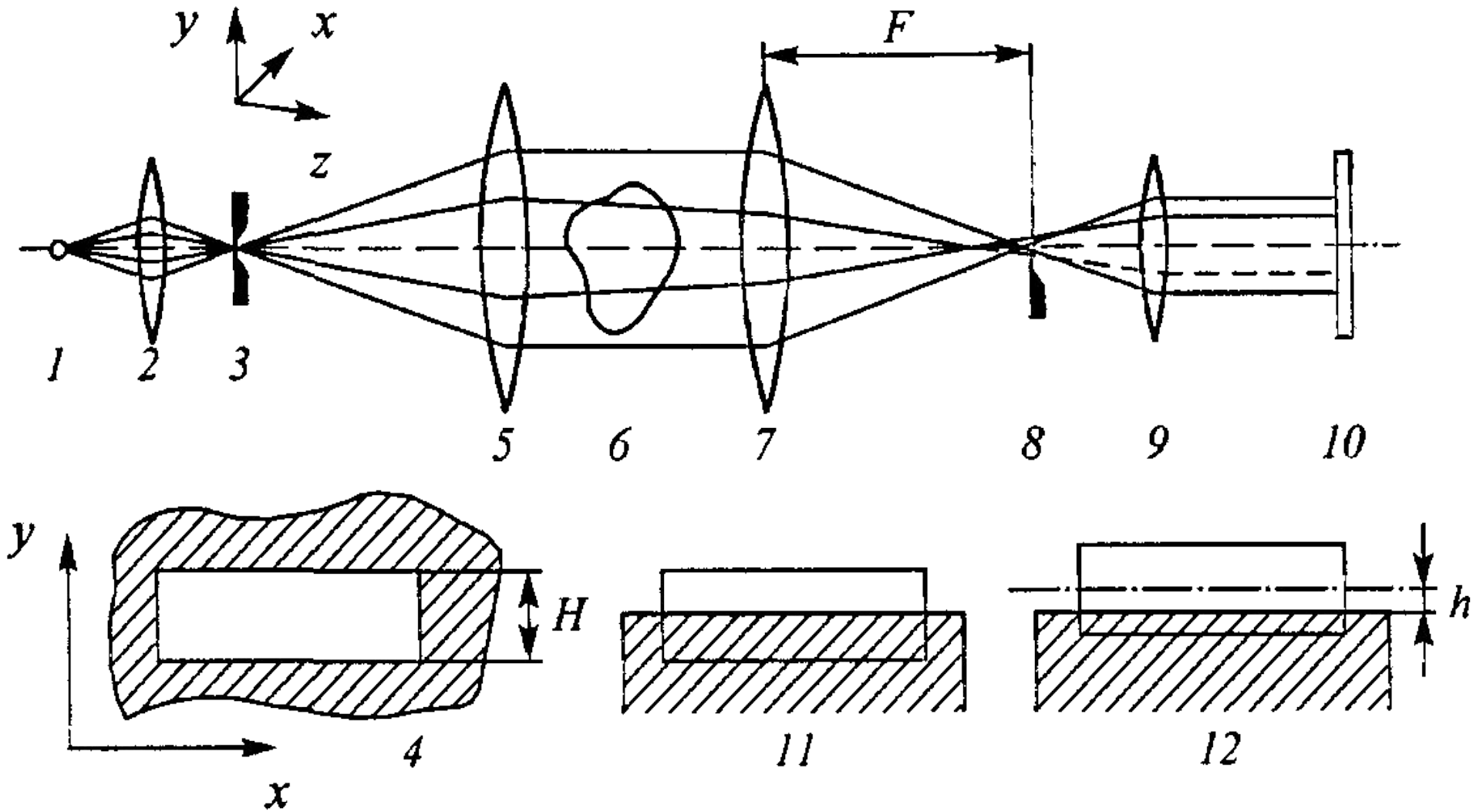
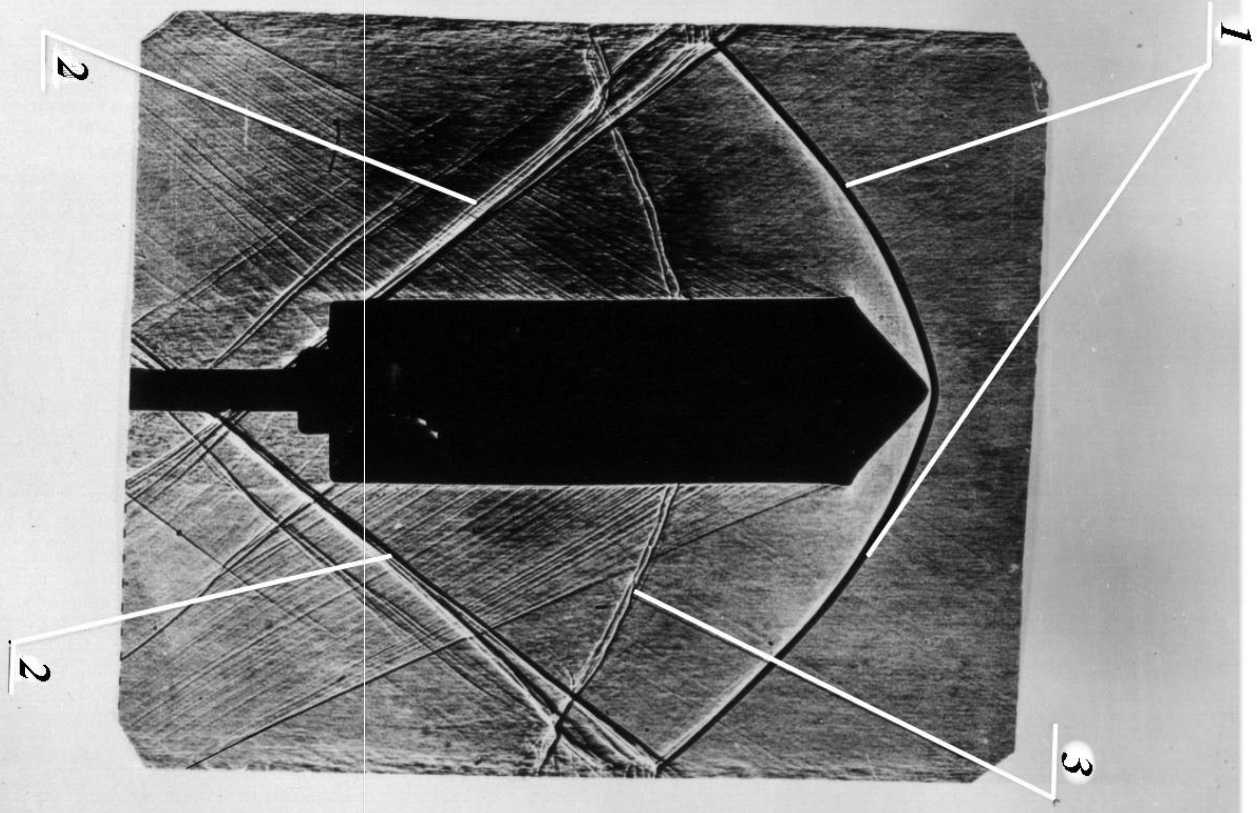
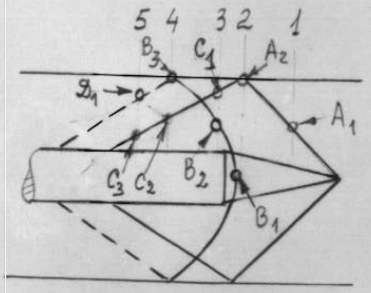
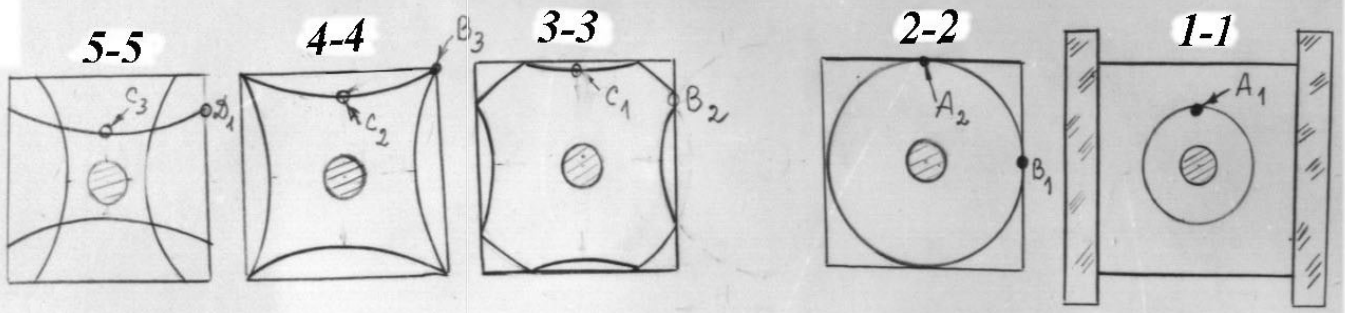
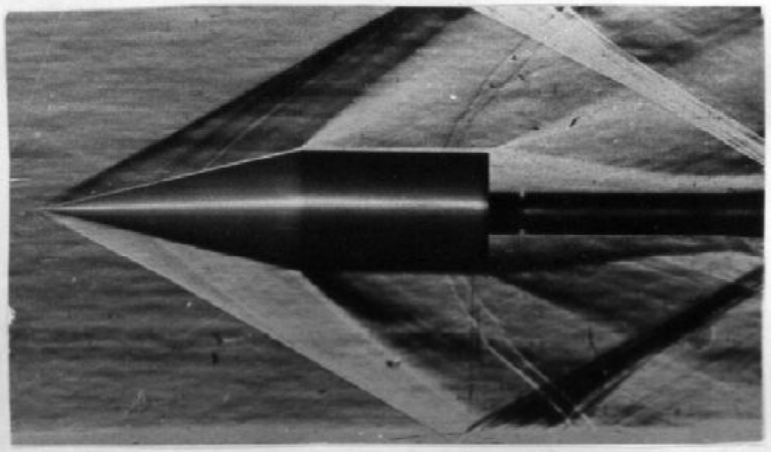


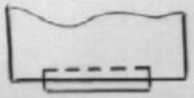
Рис. 6.23. Оптическая схема теневого метода

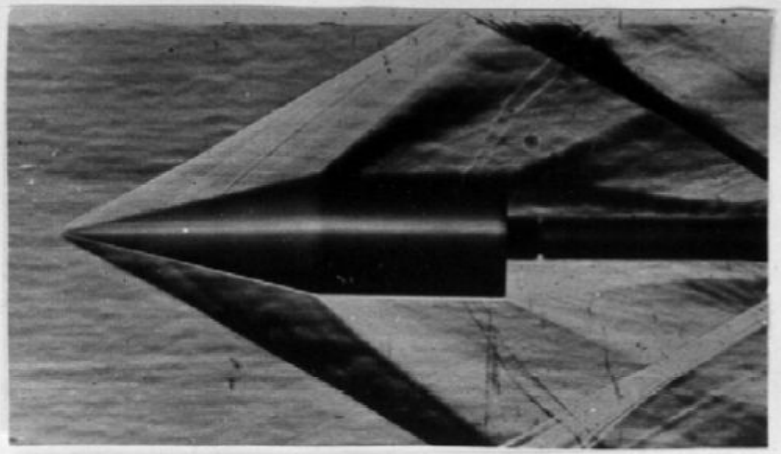

1
2
2
3

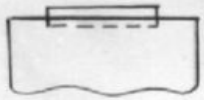

5 4 3 2 1
B3
C1
A2
D1
A1
C3 C2
B2
B1

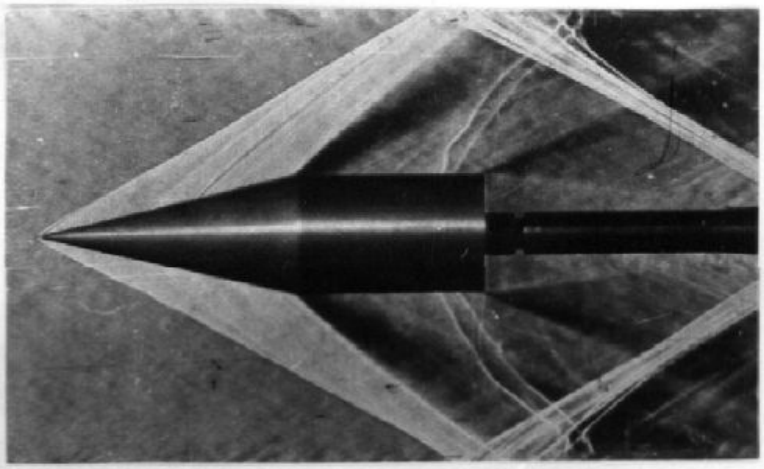

5-5
C3
D1
4-4
B3
C2
3-3
C1
B2
2-2
A2
B1
1-1
A1

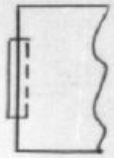


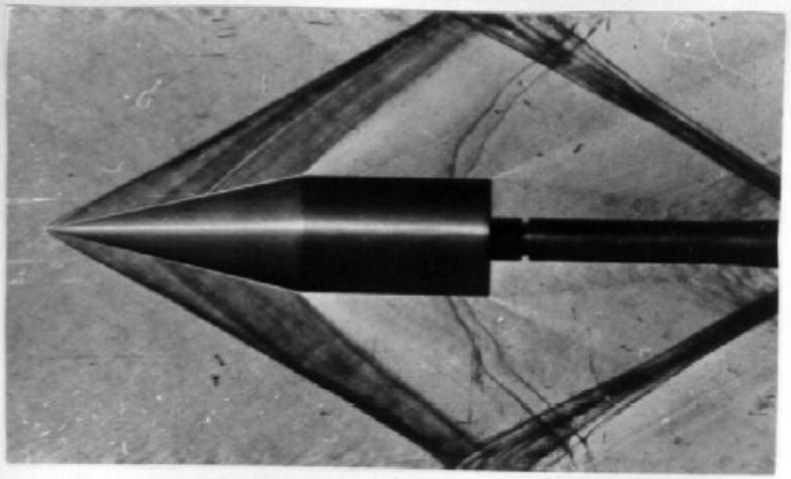
1. 



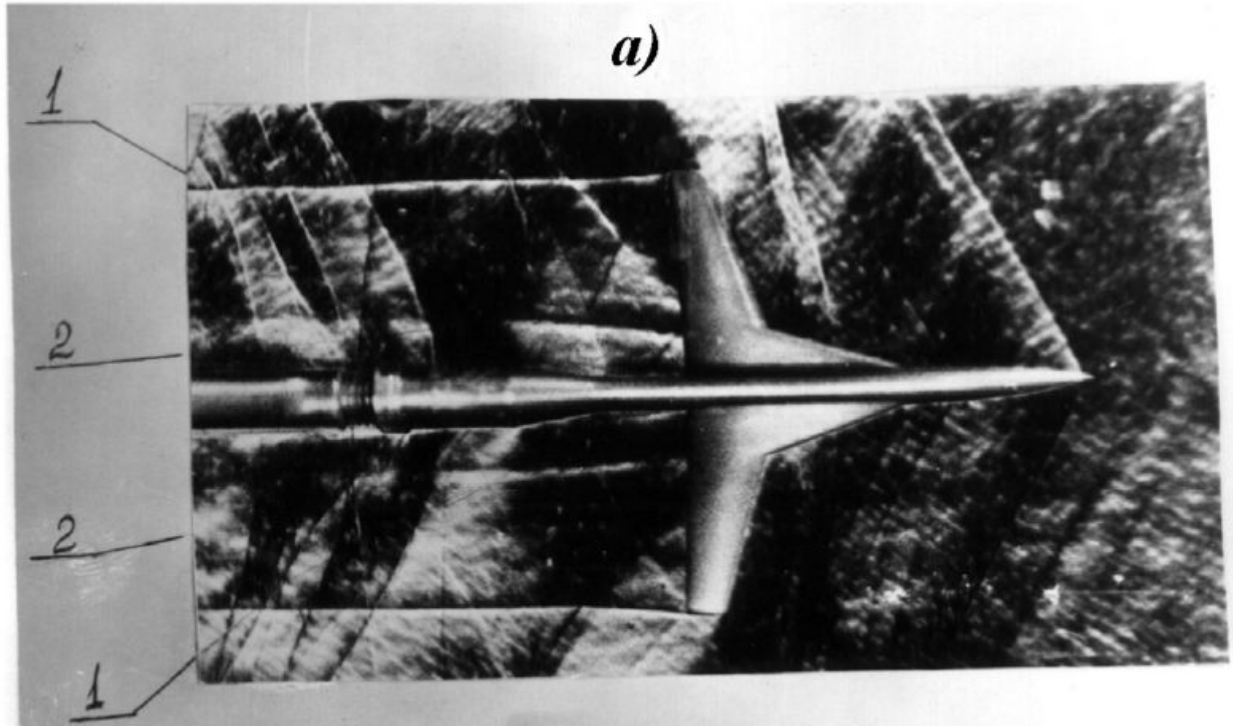
2 

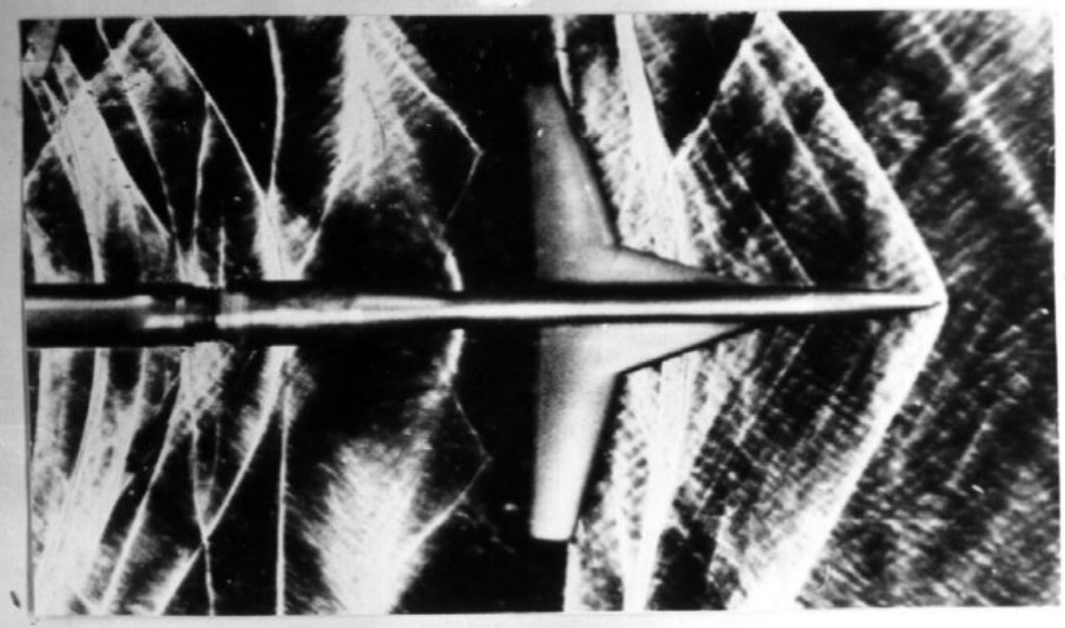


3. 



4.


a)
1
2
2
1


b)

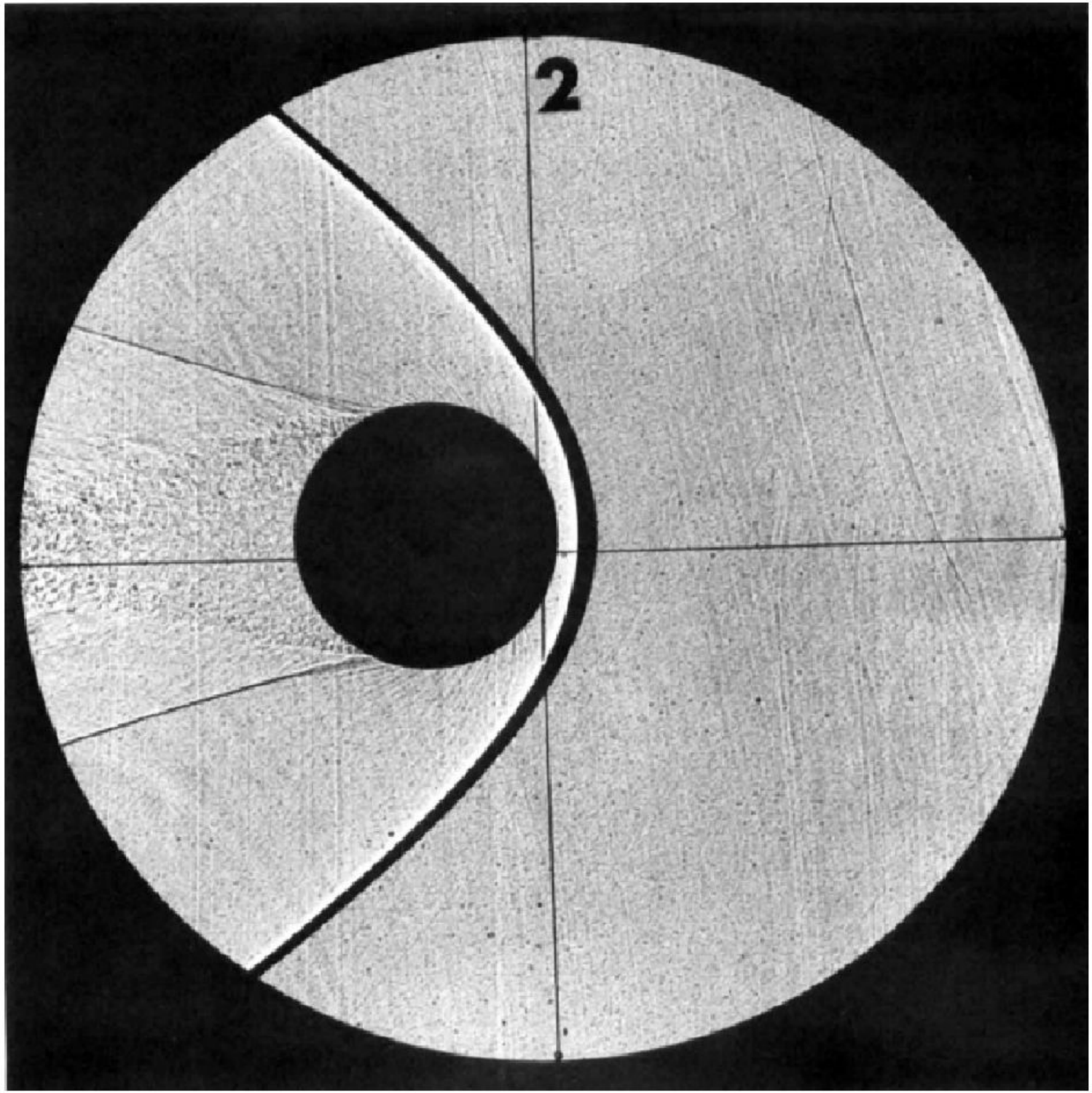
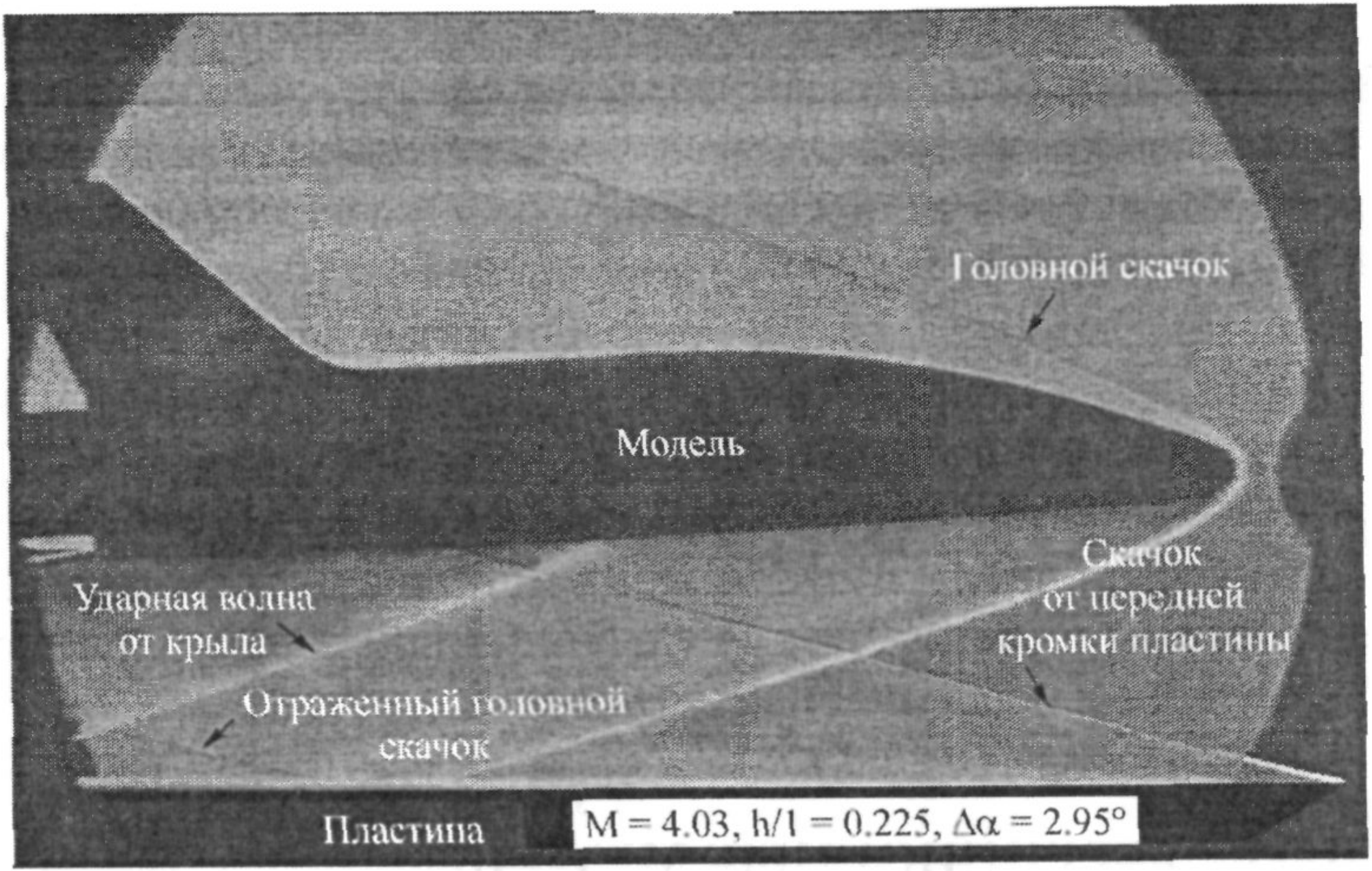
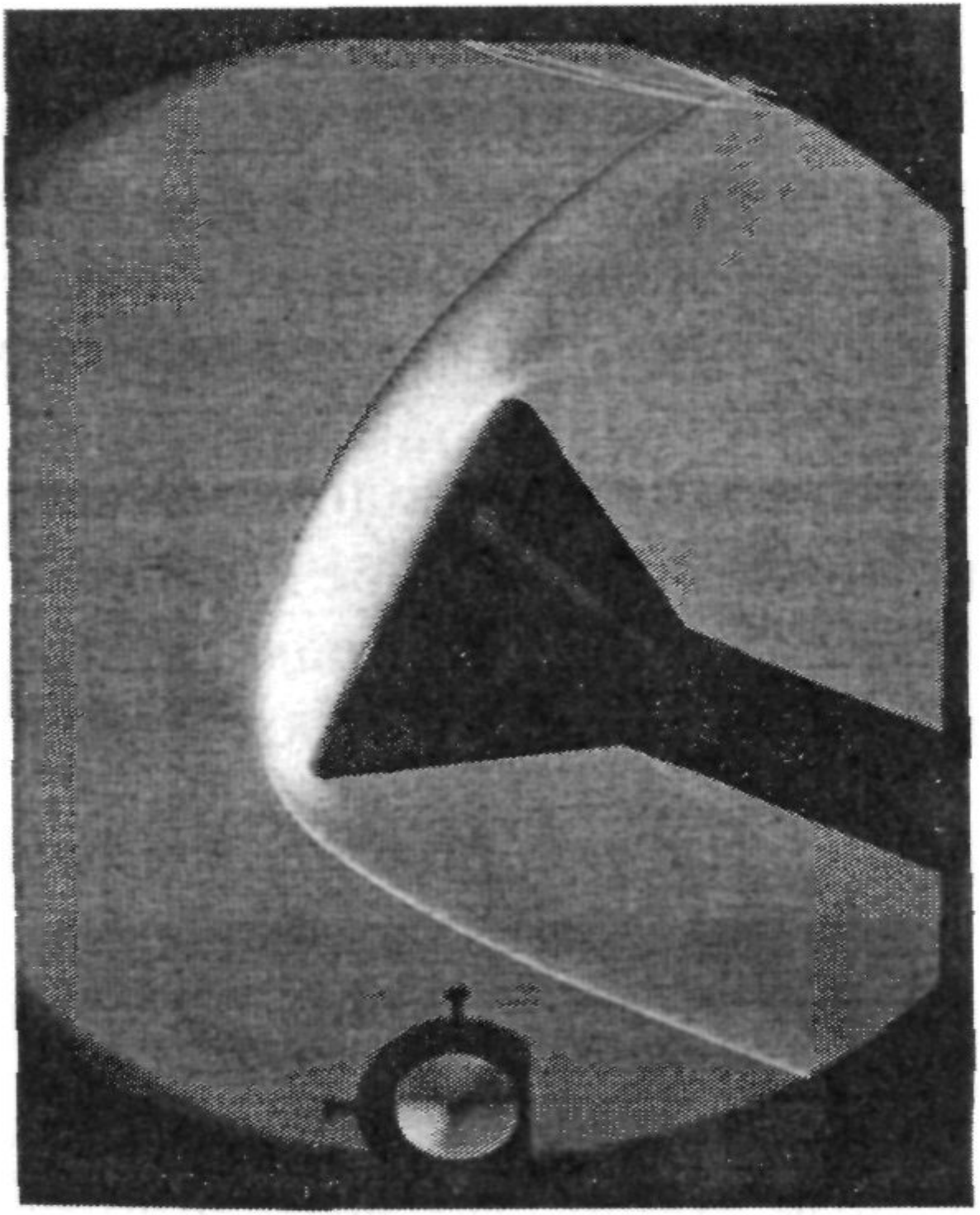


Fig. 3.6 Shadowgraph of a sphere flying at a Mach number $M = 1.7$. (From Stilp, 1968.)


Головной скачок
Модель
Скачок
от передней
кромки пластины
Ударная волна
от крыла
Отраженный головной
скачок
Пластина
M = 4.03, h/l = 0.225, Δα = 2.95°

а



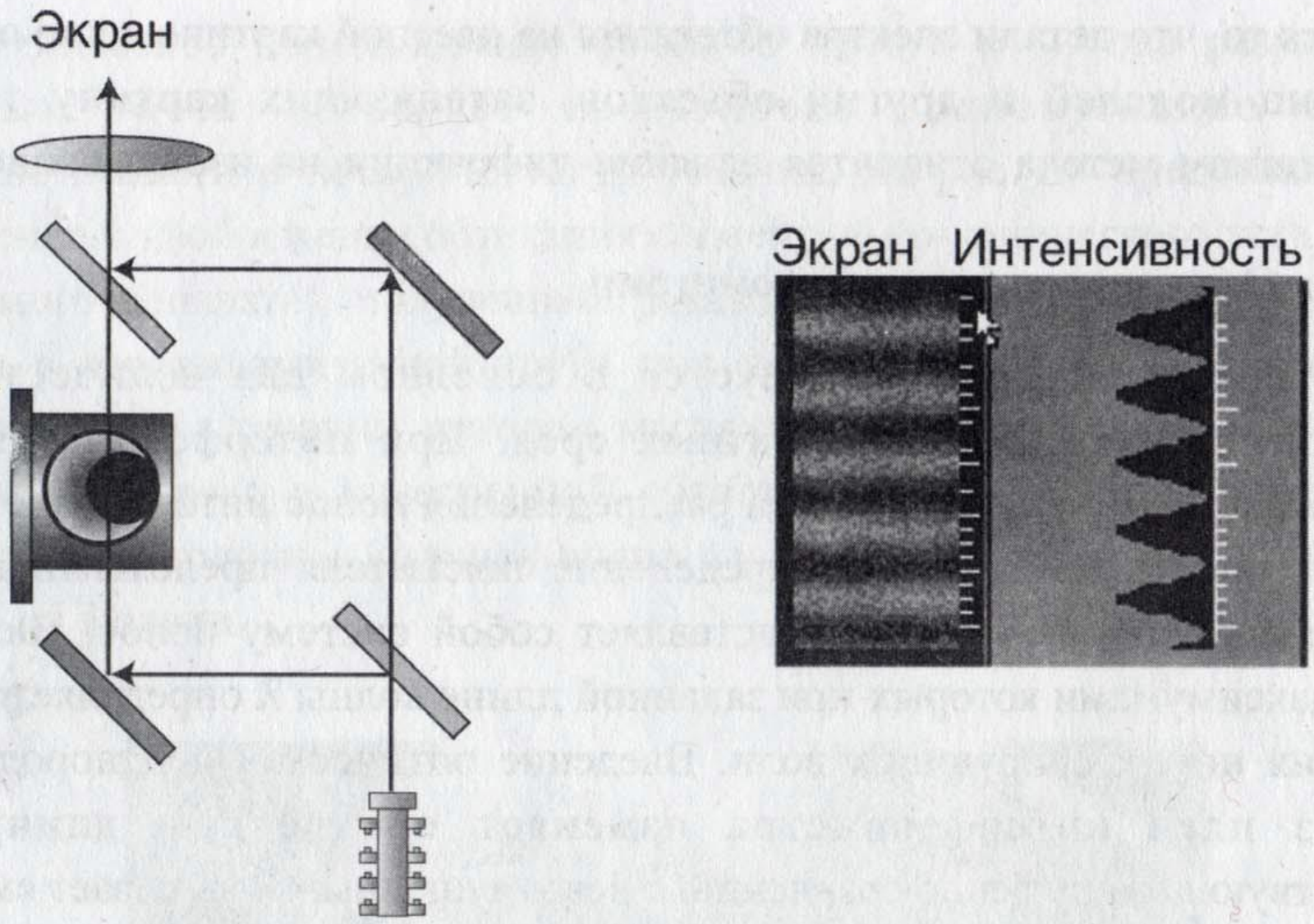


Рис. 15. Схема интерферометра Маха- Цендера

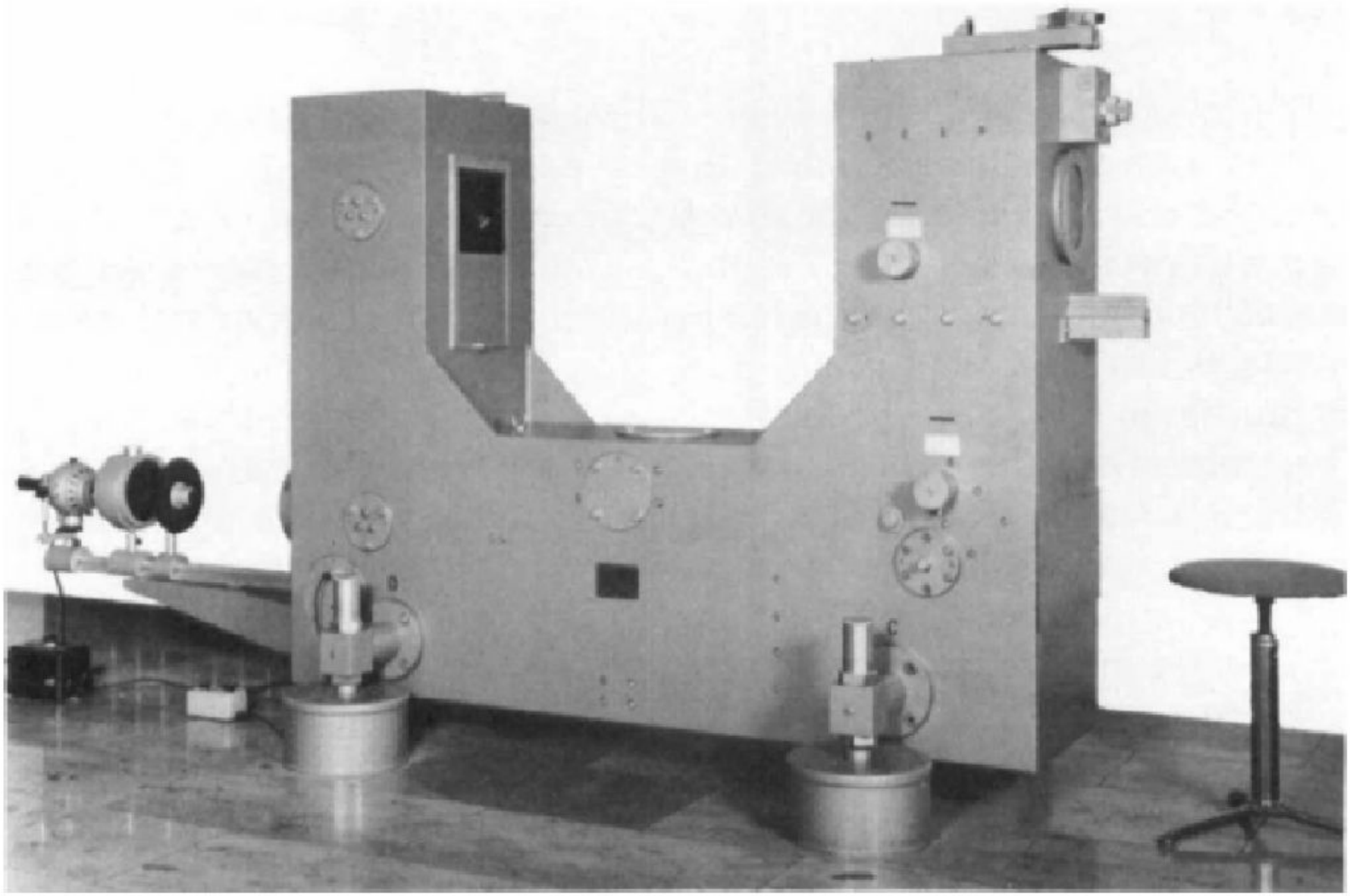
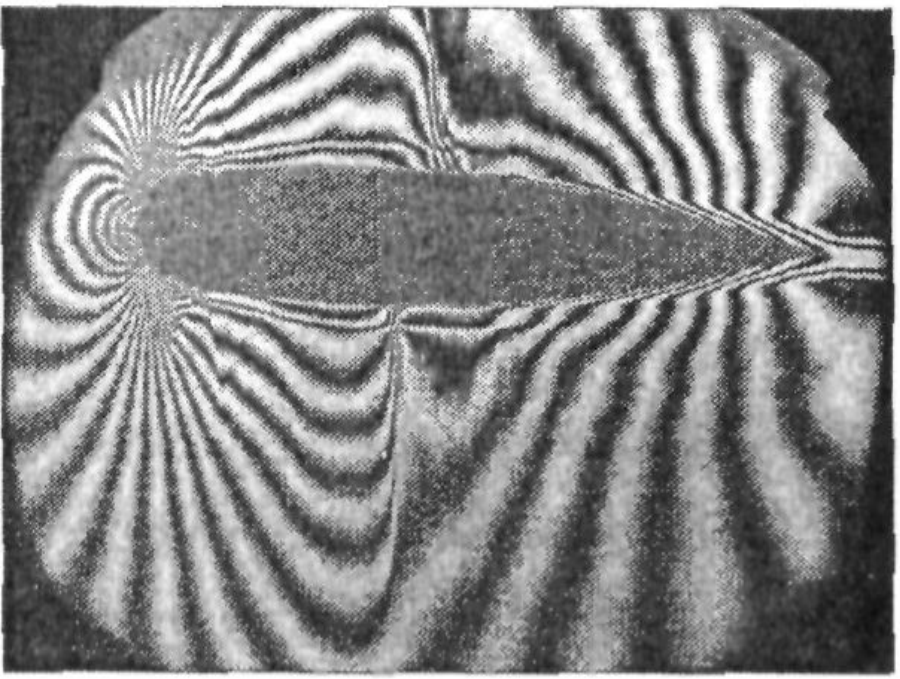
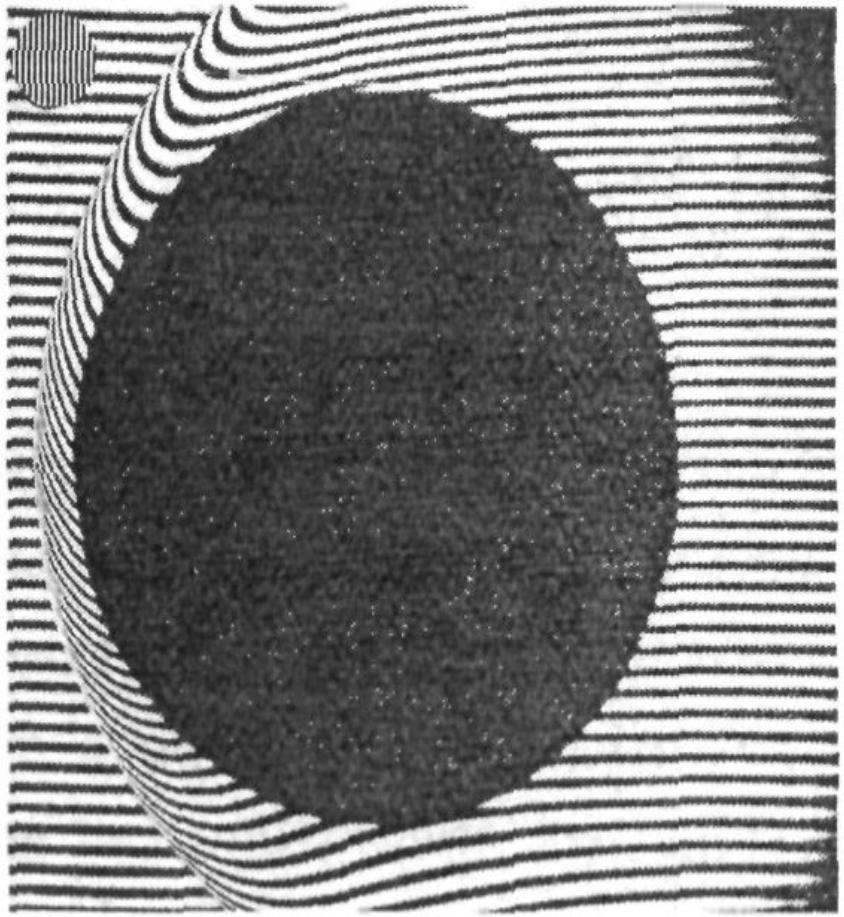


Fig. 3.34 Mach–Zehnder interferometer manufactured by Zeiss, Oberkochen, Germany.



а



б

Рис. 6.26. Примеры интерферограмм:

а – обтекание симметричного профиля при M = 0,8; *б* – обтекание шара при M = 5,7 [166]

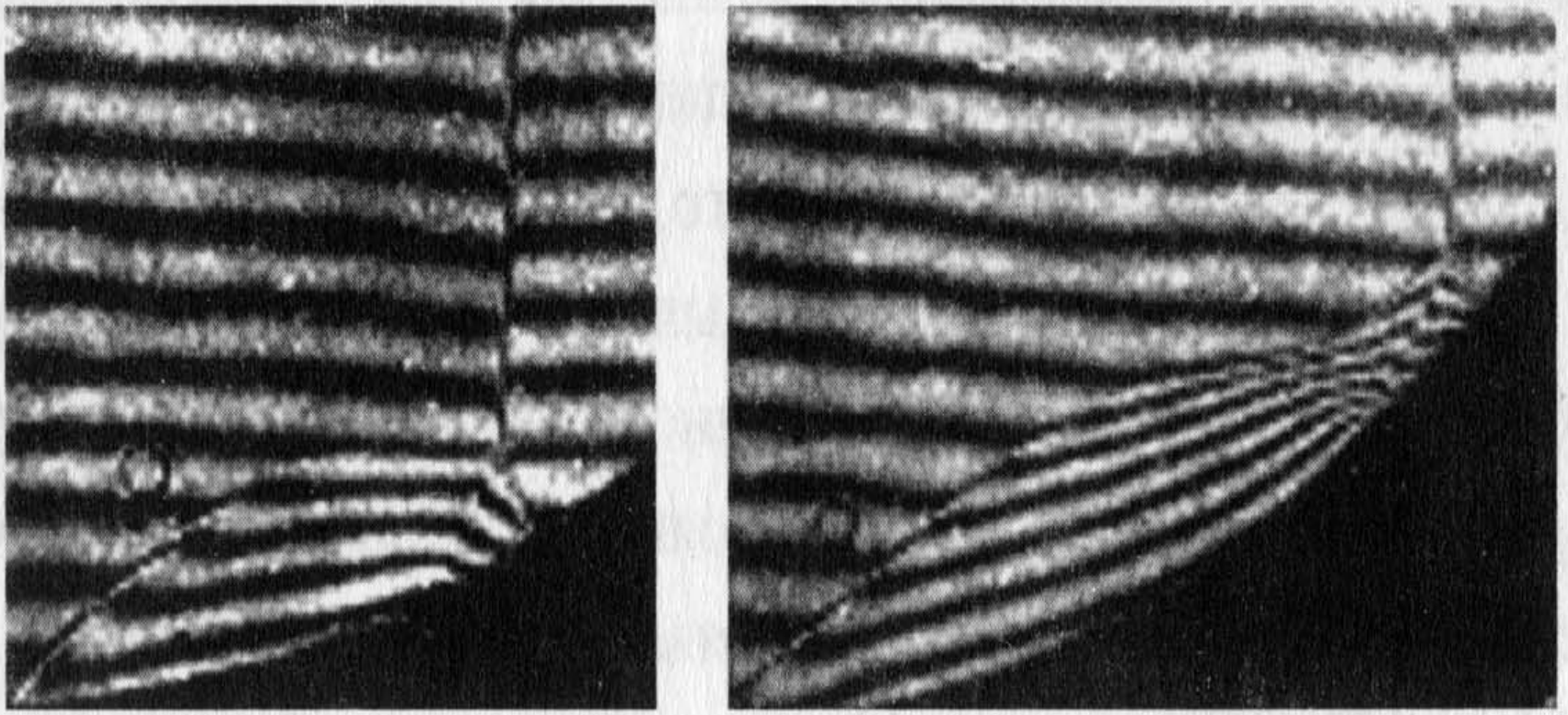
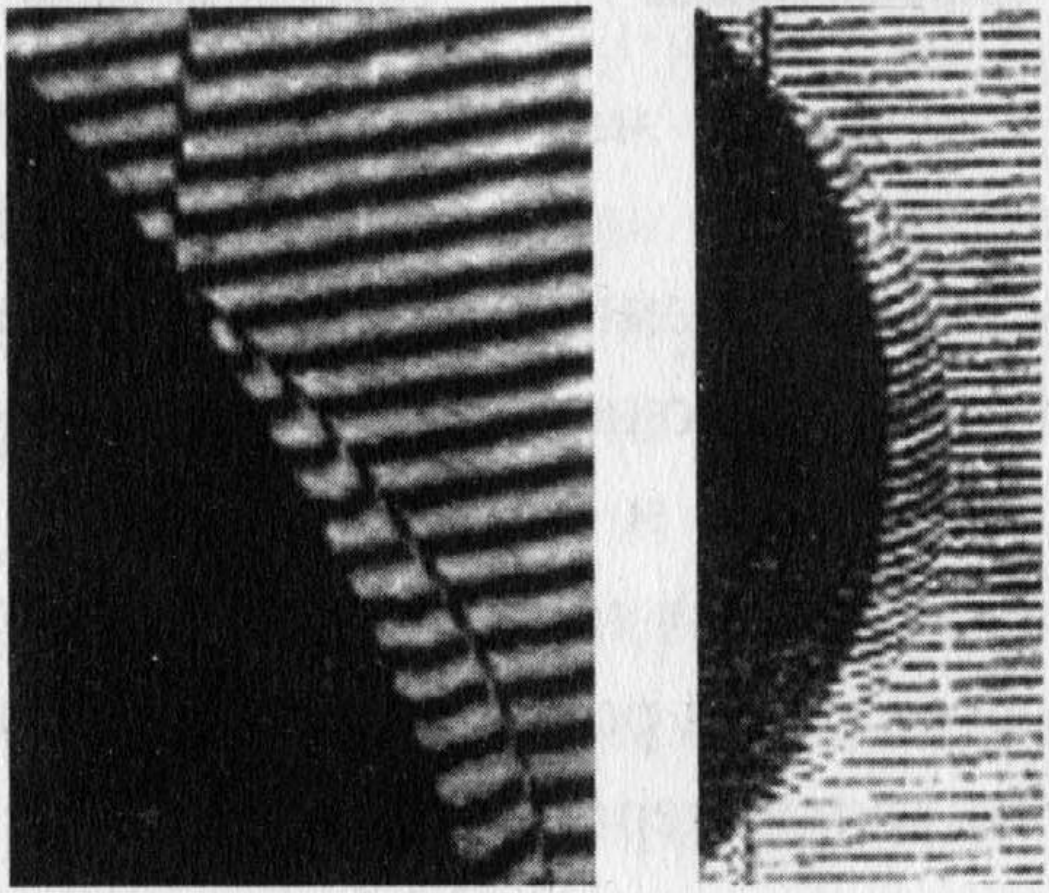


Рис. 17. Отраженеие ударной волны от вогнутой цилиндрической поверхности



а *б*

Рис. 18. Регулярное отражение плоской ударной волны от выпуклых поверхностей

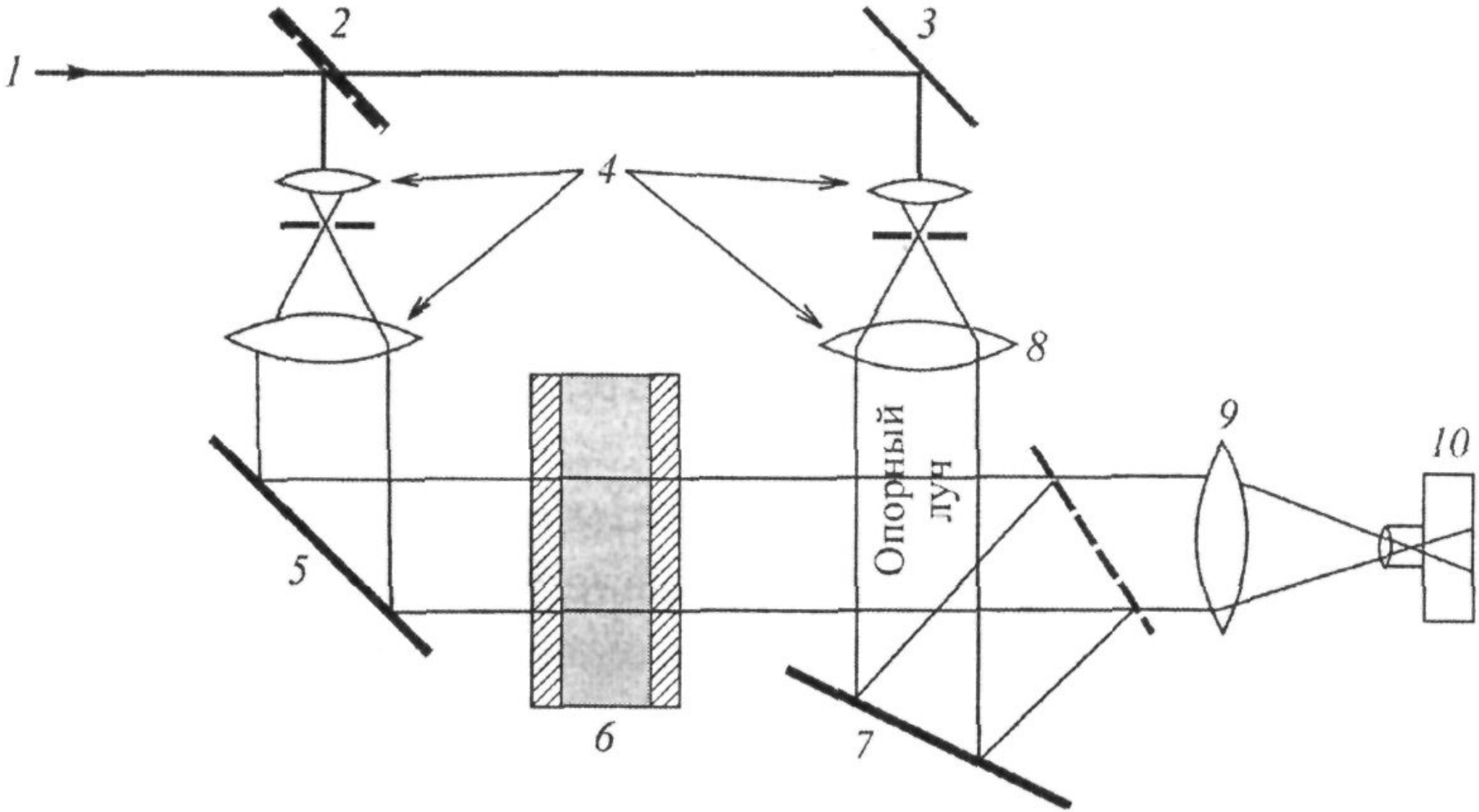


Рис. 6.27. Принципиальная схема голографического интерферометра [165]

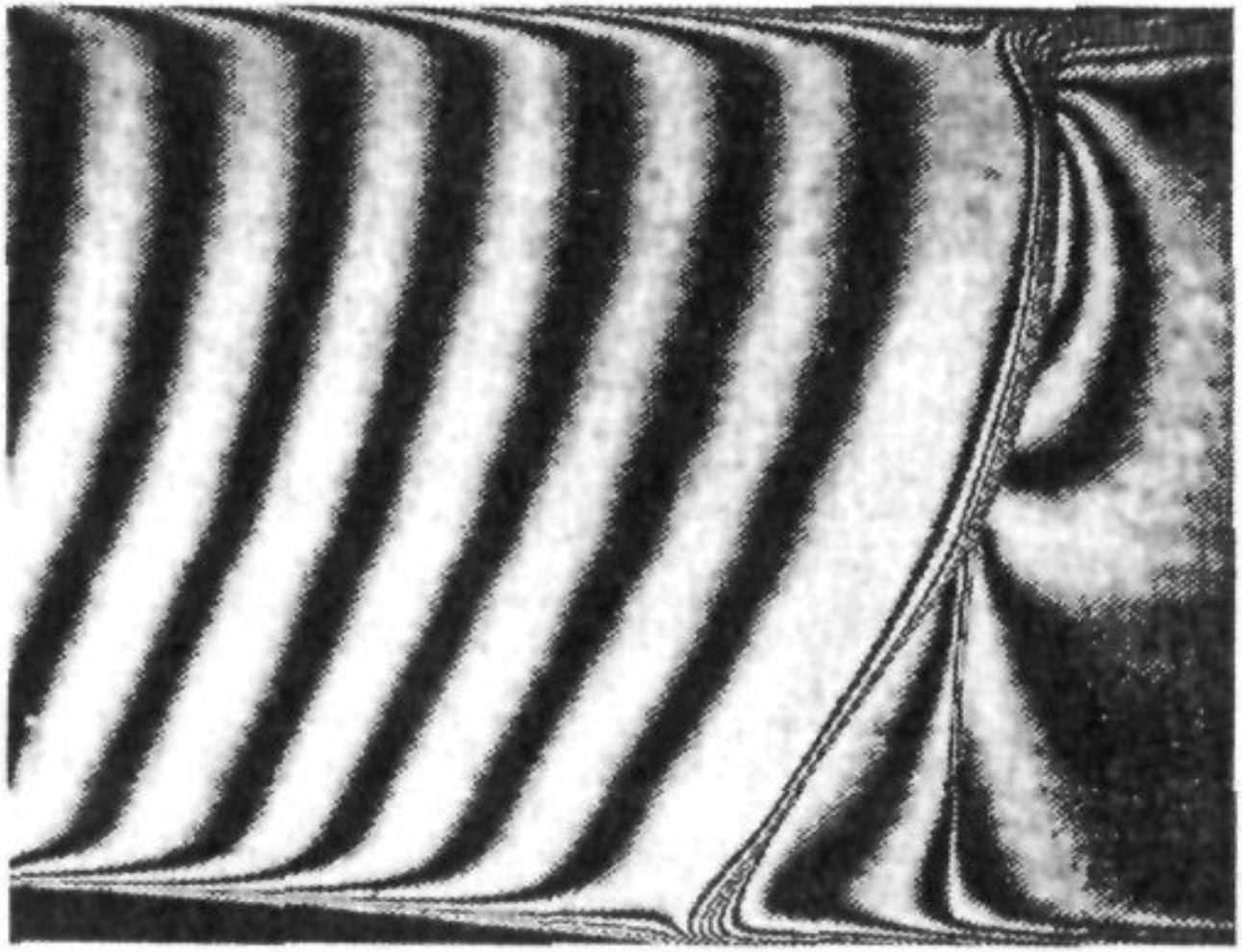


Рис. 6.28. Голографическая интерферограмма течения в канале с уступом [166]

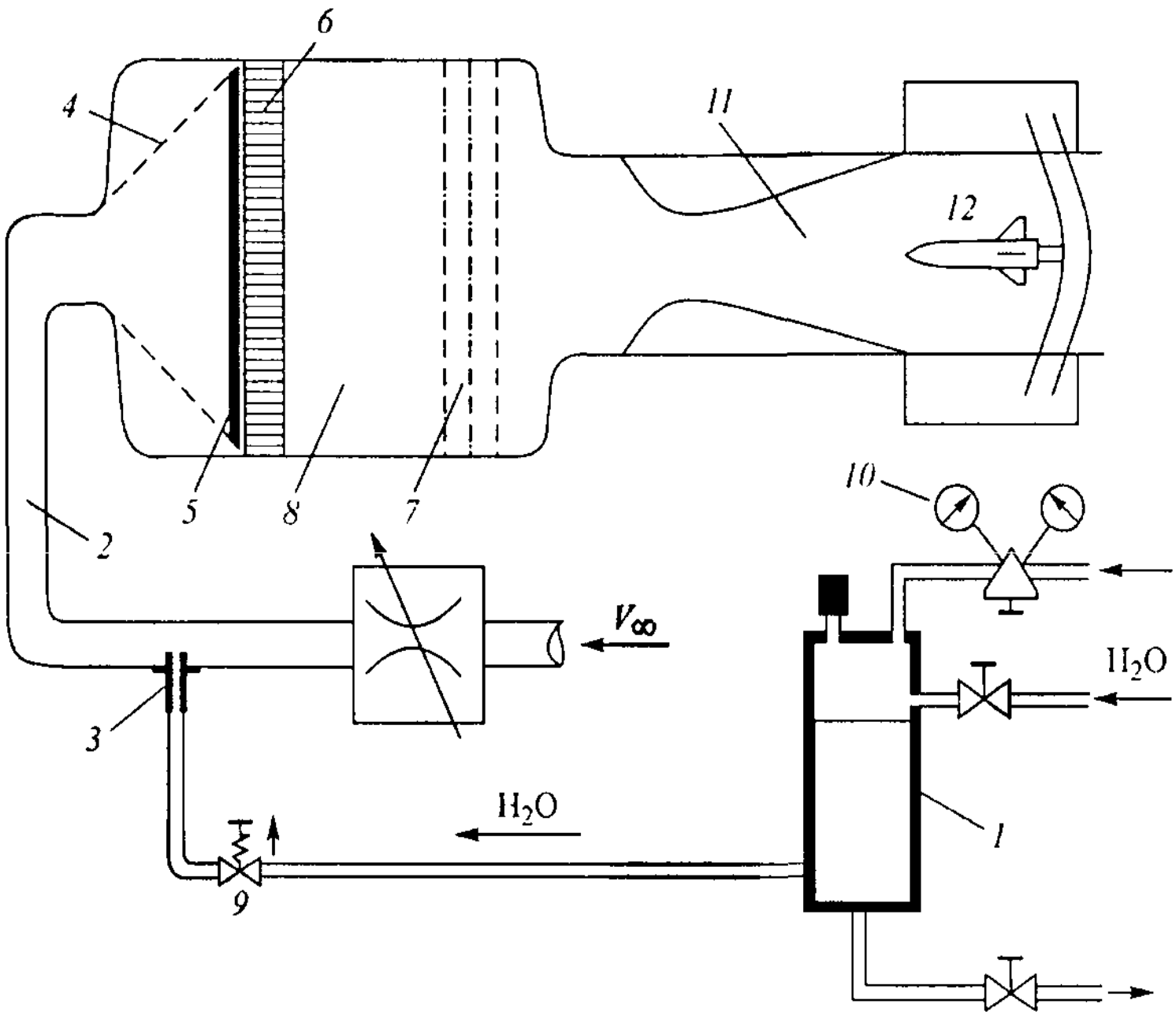
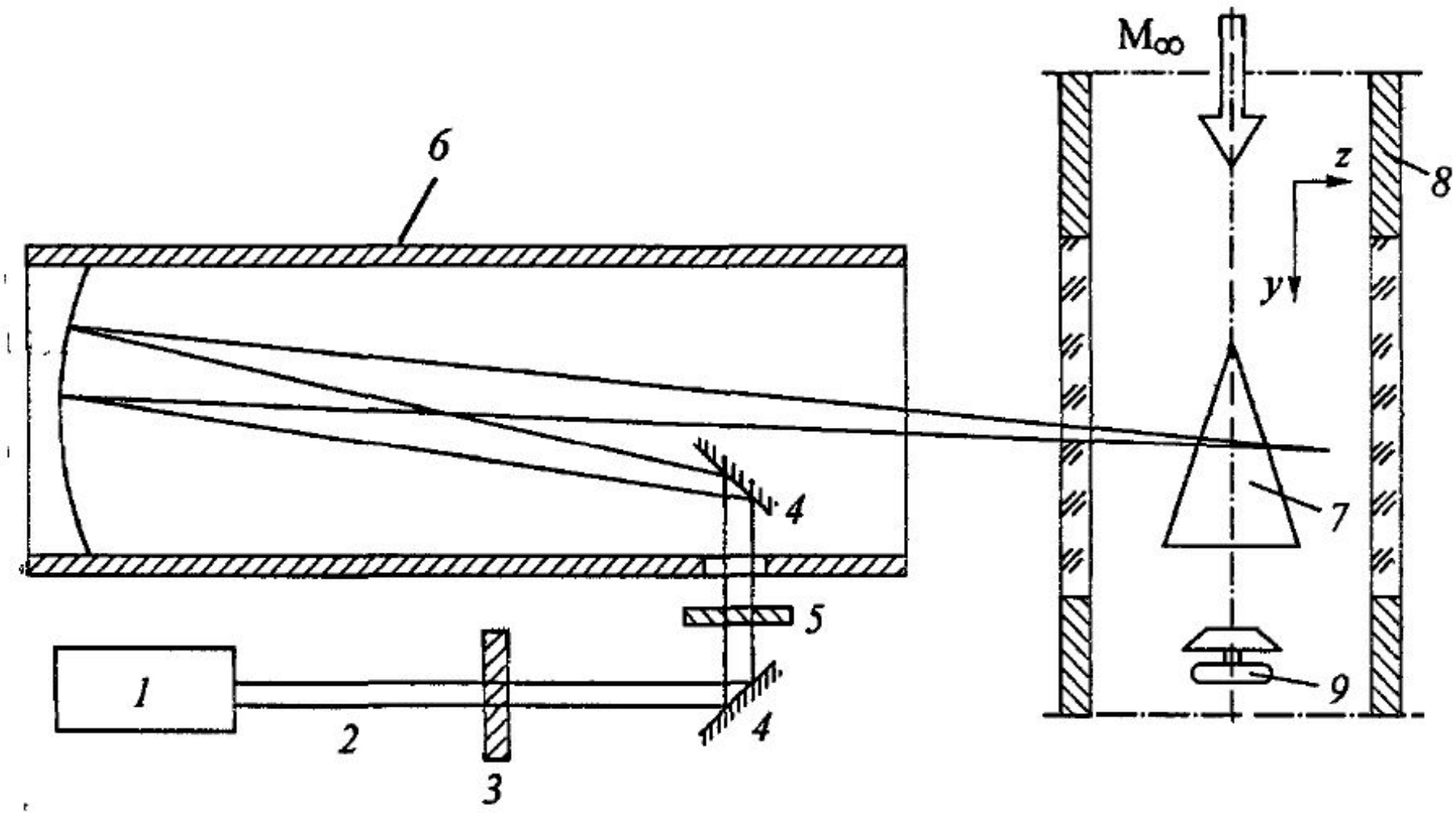
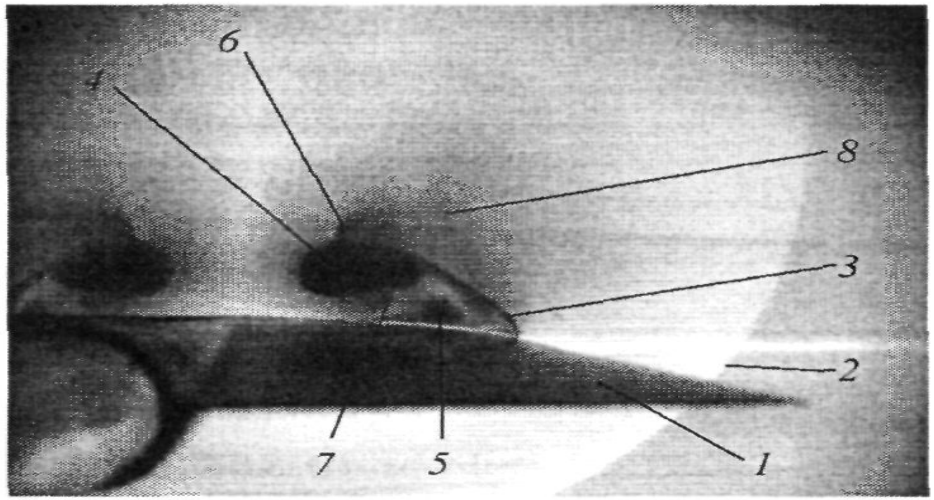


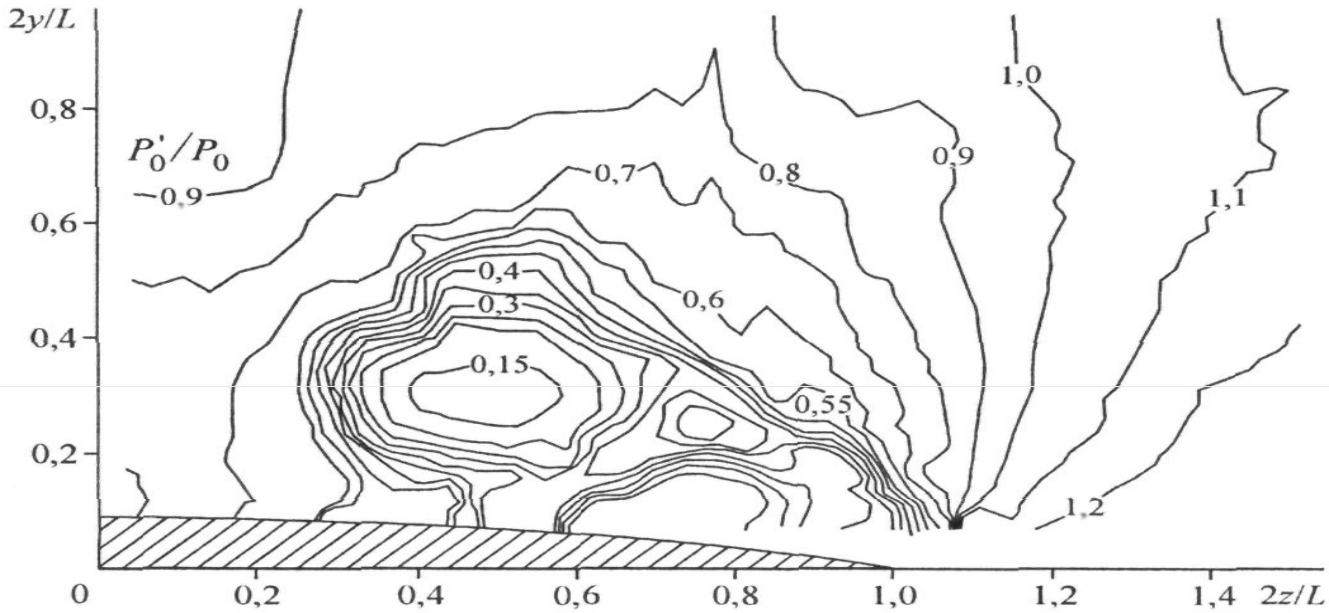
Рис. 6.29. Схема ввода светорассеивающих частиц в тракт трубы Т-313



Оптическая схема формирования «лазерного ножа» [196]



а



б

Рис. 6.31. Вихревая пелена на подветренной стороне крыла треугольного крыла:

а – визуализация методом «лазерного ножа»; *б* – зондирование насадком полного давления

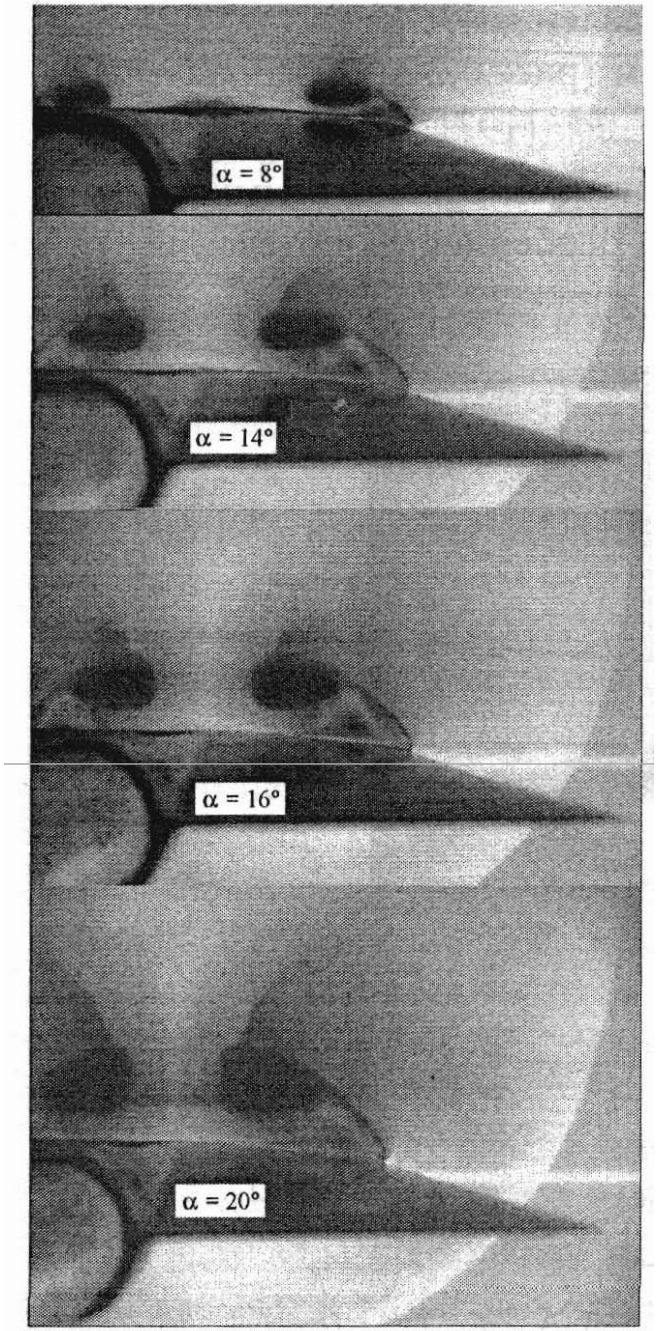


Рис. 6.32. Картины визуализации обтекания треугольного крыла при $\chi = 78°$, $M_\infty = 2{,}75$

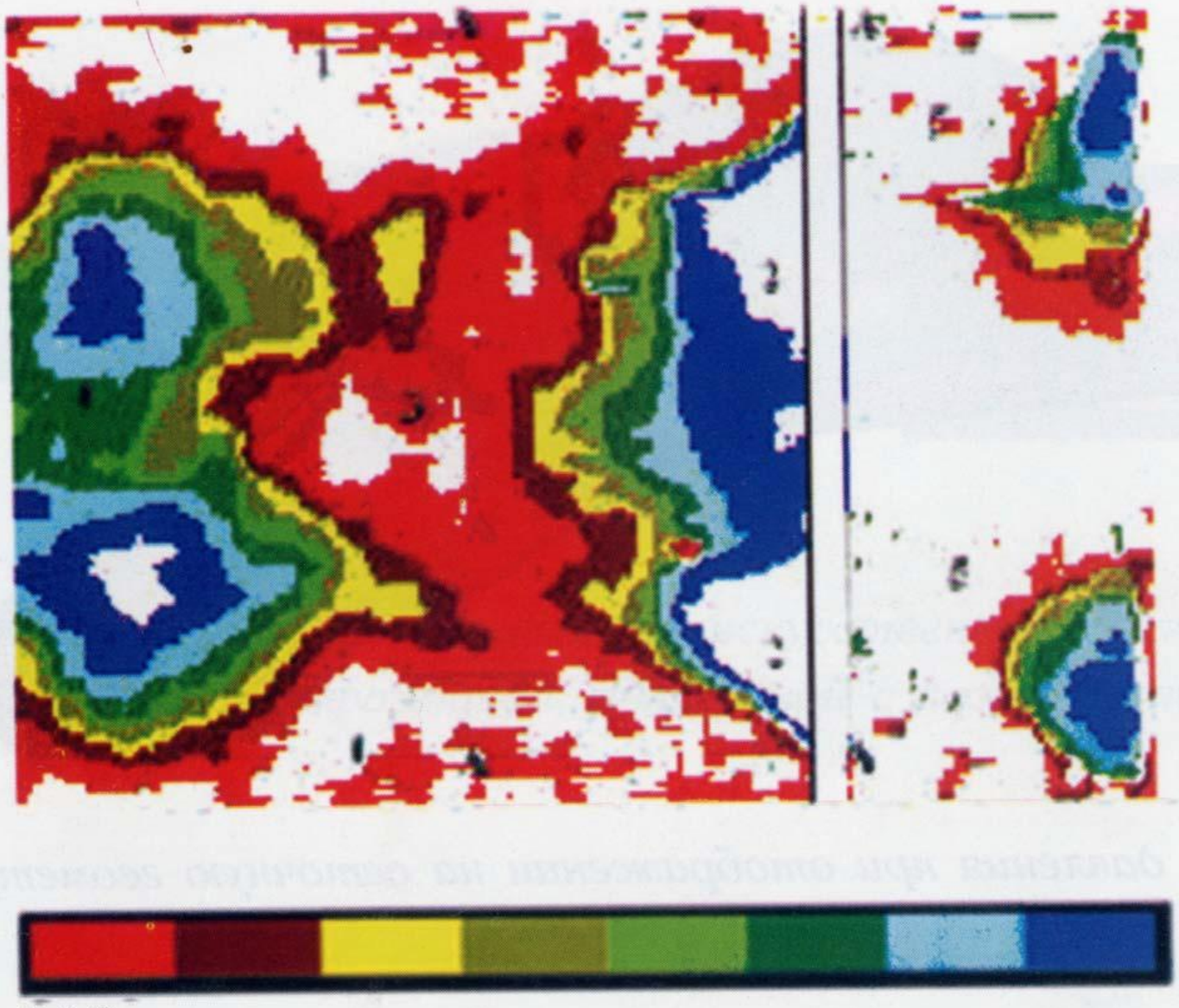


Рис. 3. Визуализация жидкими кристаллами

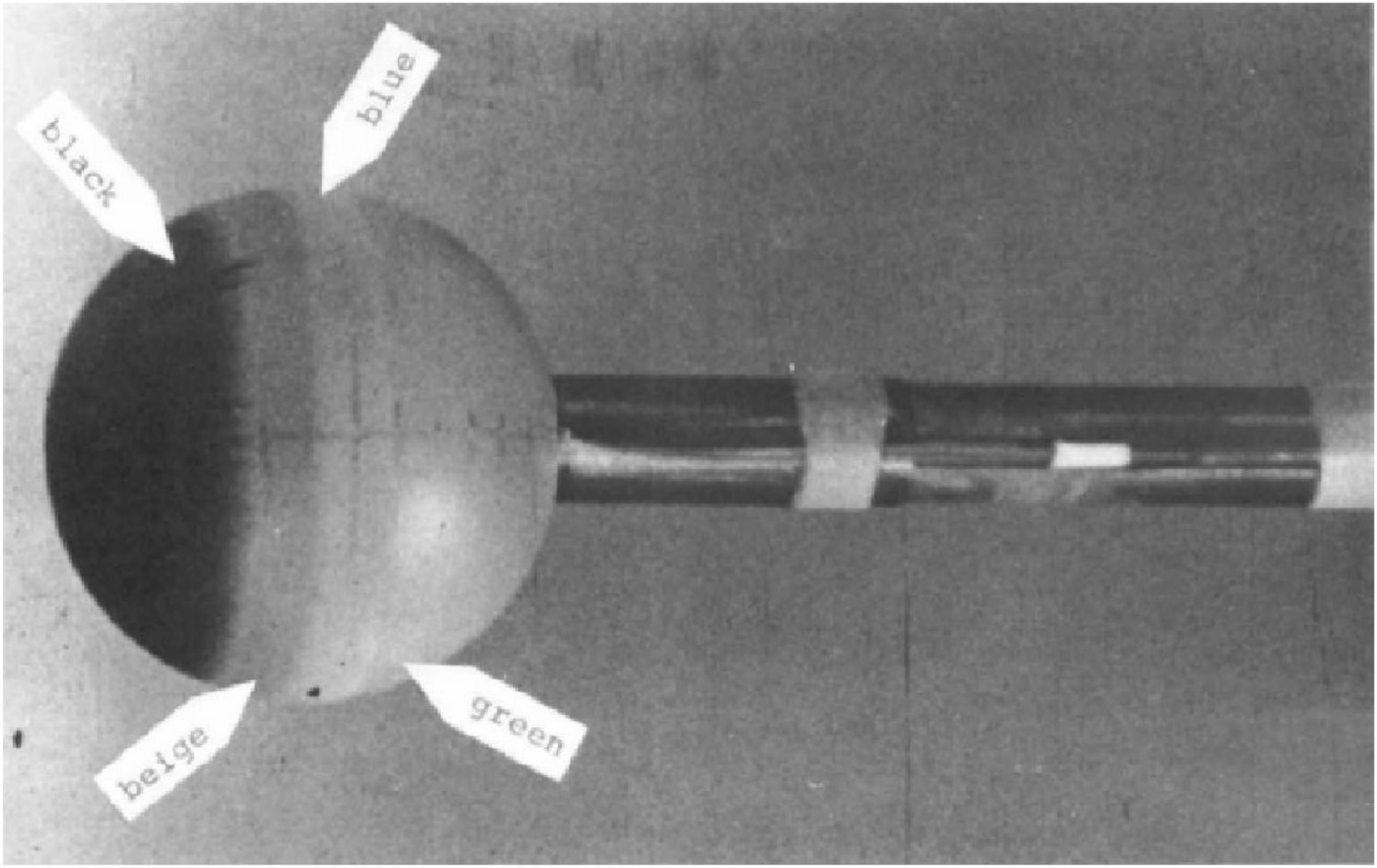


Fig. 2.51 Pattern of thermosensitive paint on a sphere after 3 sec of exposure to a hypersonic, high-enthalpy flow; Mach number $M = 10$, stagnation temperature = 1000 K. (From Cérésuela *et al.*, 1965.)

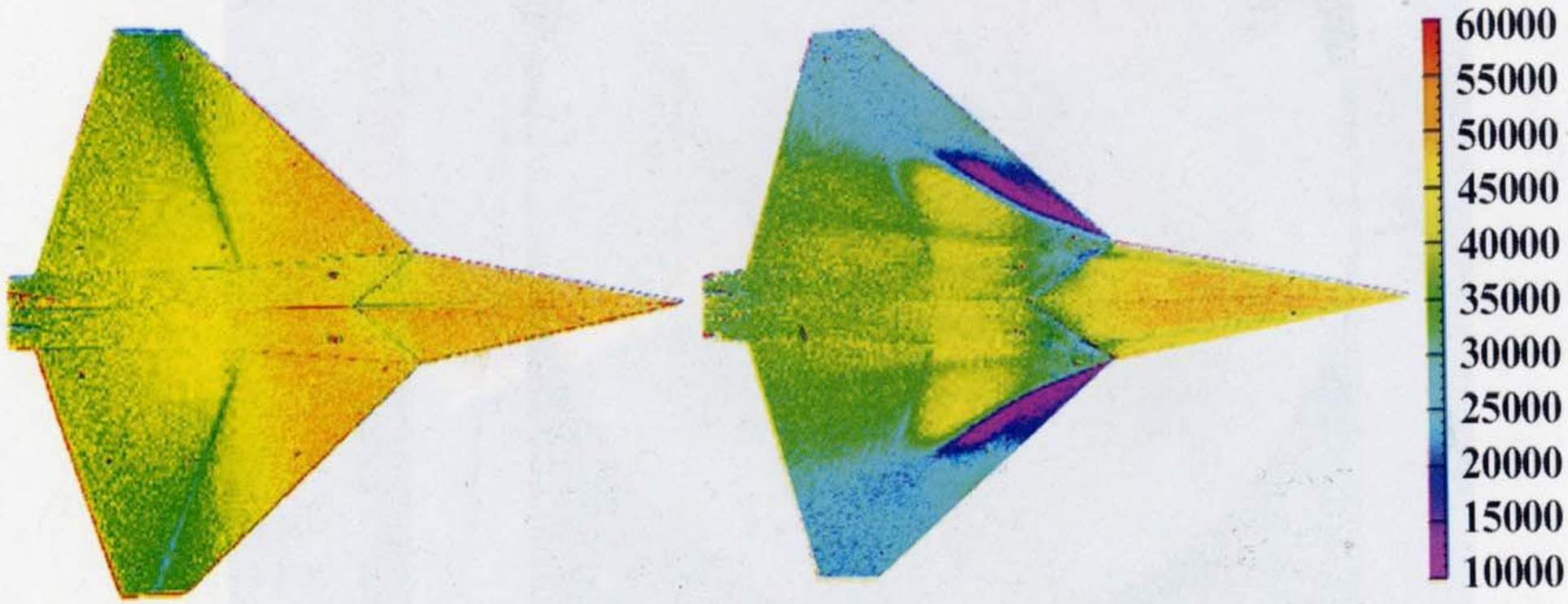


Рис. 4. Поля давления на поверхности модели

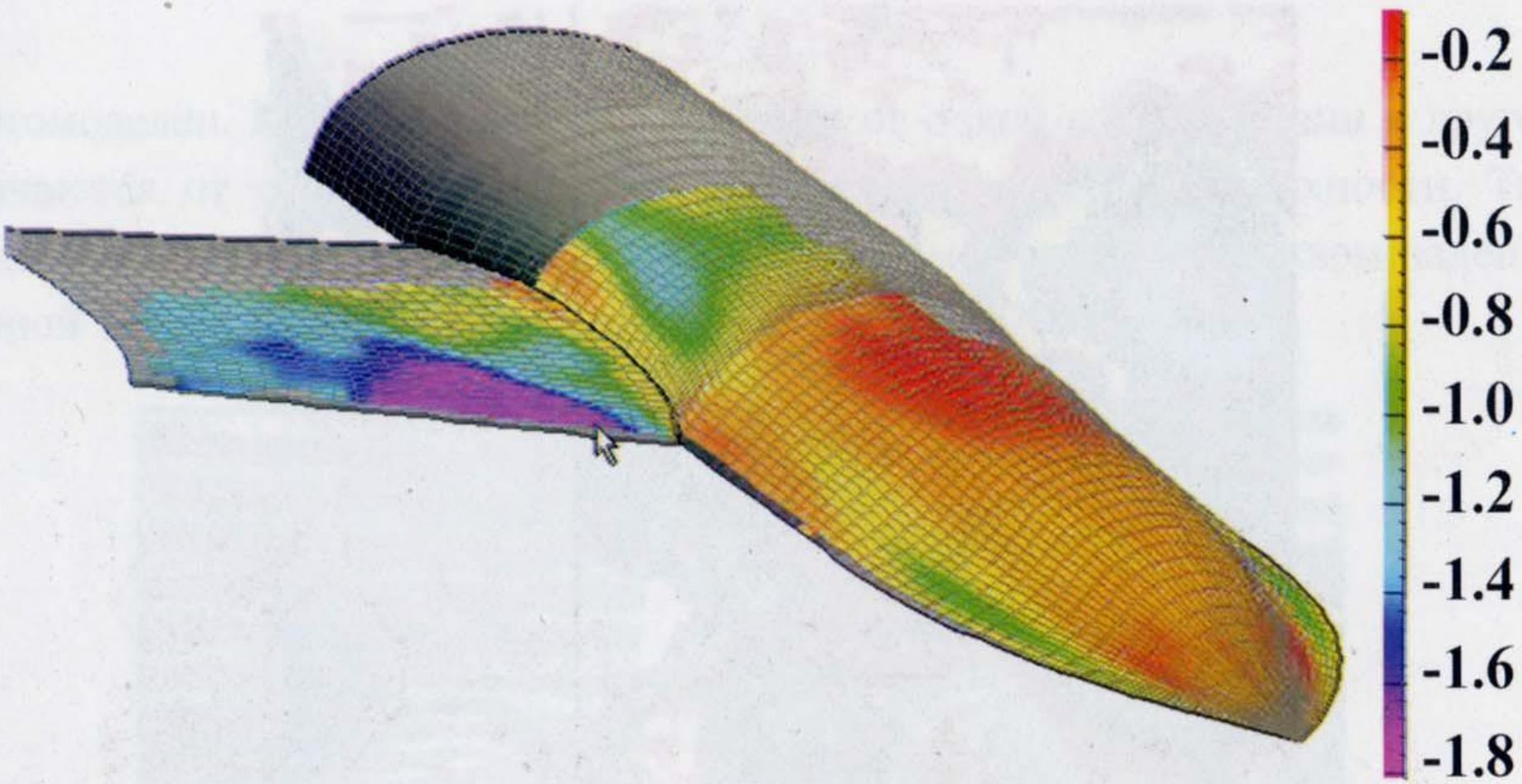


Рис. 5. Поле давления при отображении на сеточную геометрию модели

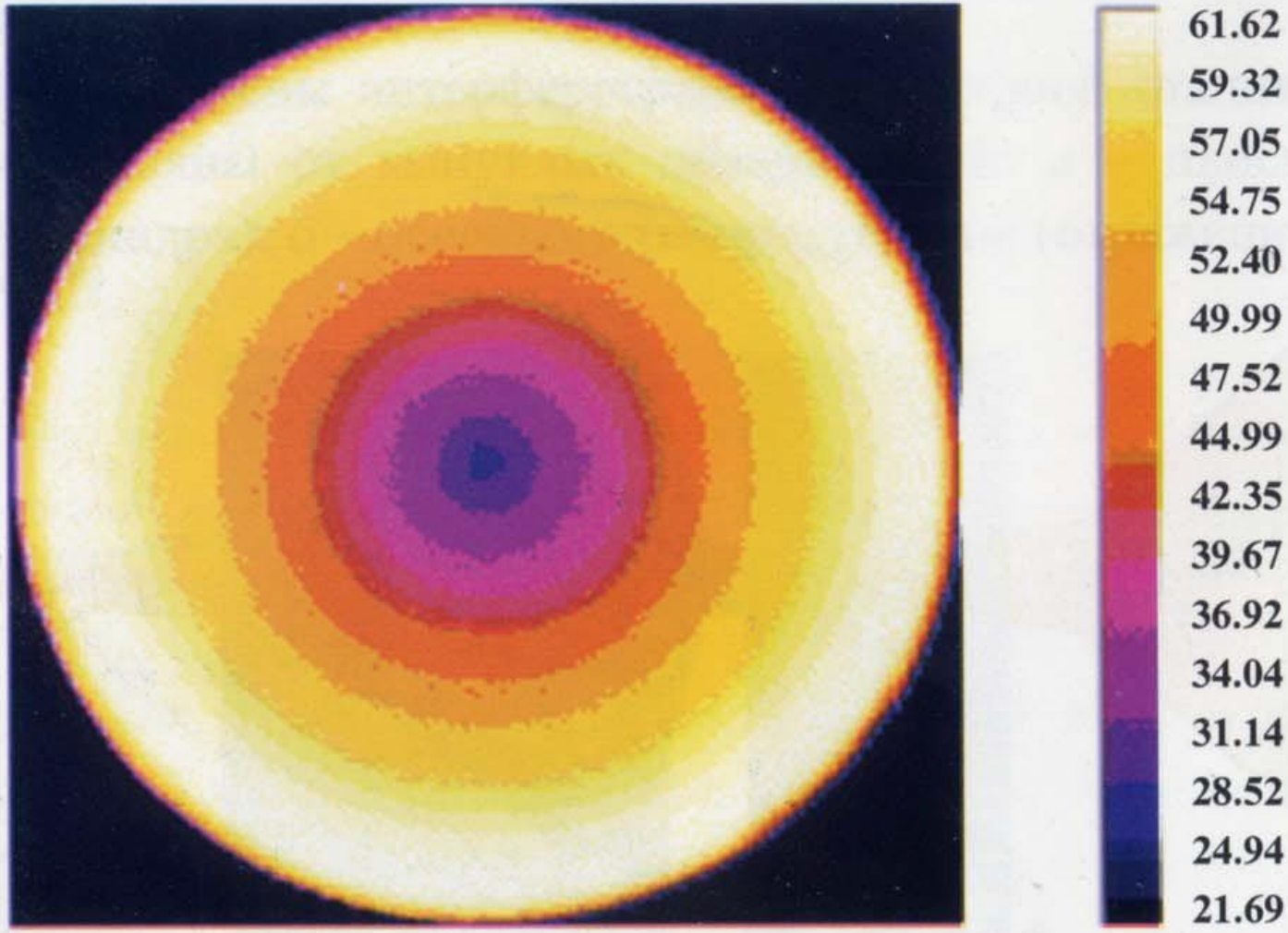


Рис. 7. Распределение числа Нуссельта, зарегистрированное методом инфракрасной термографии на поверхности вращающегося цилиндра

Сканирование электронным пучком

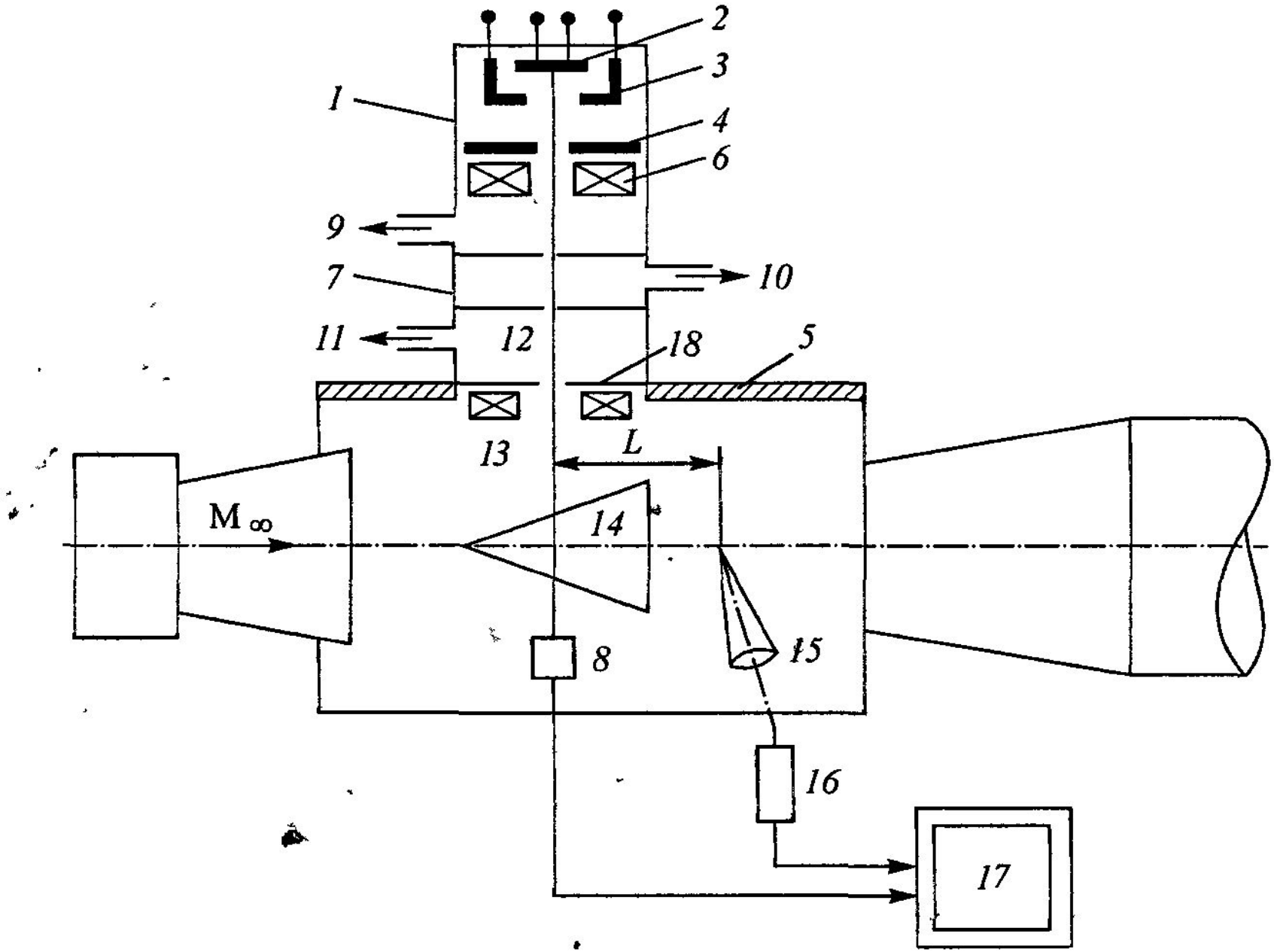


Рис. 6.33. Принципиальная схема системы создания электронного пучка

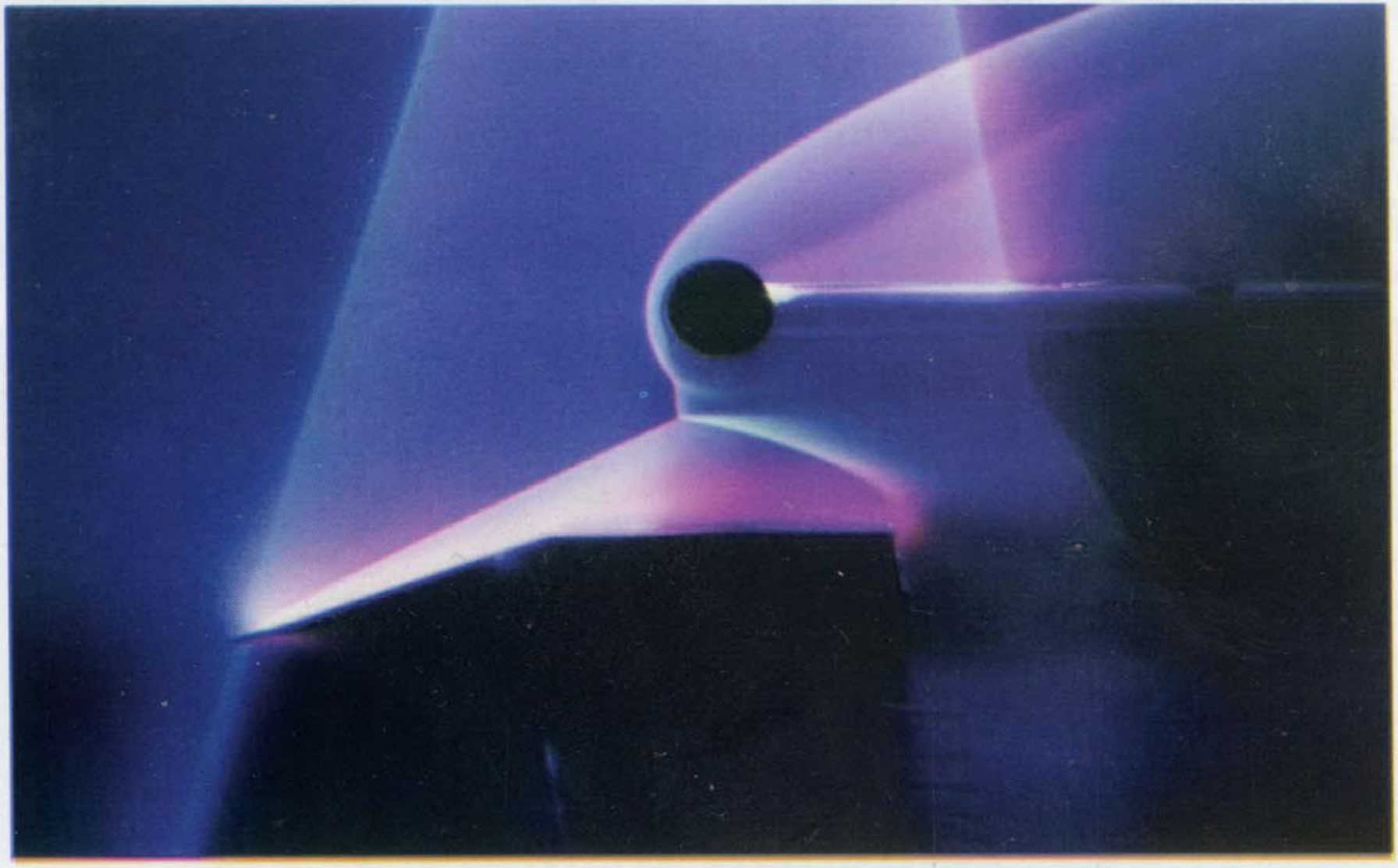


Рис. 24. Визуализация потока методом флюоресценции при возбуждении электронным пучком