

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:

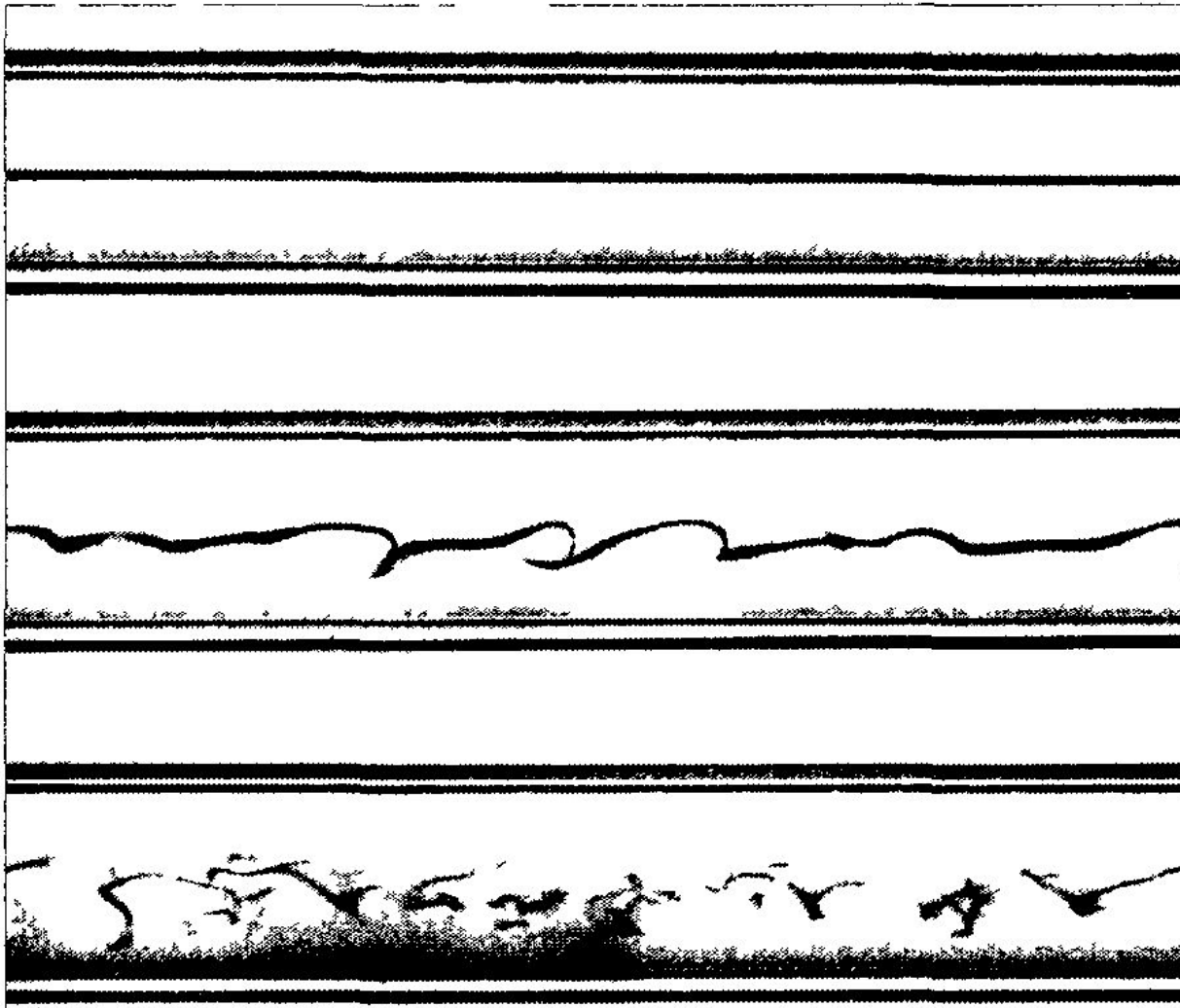
- метод шелковинок и экрана с шелковинками
- дымовые методы;
- оптические методы (теневые, интерференционные, голографические);
- метод лазерного ножа;
- метод нагретой проволочки;
- метод высоковольтного разряда.
- Метод стробоскопической визуализации
- Метод движущихся частиц ( PIV метод)

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

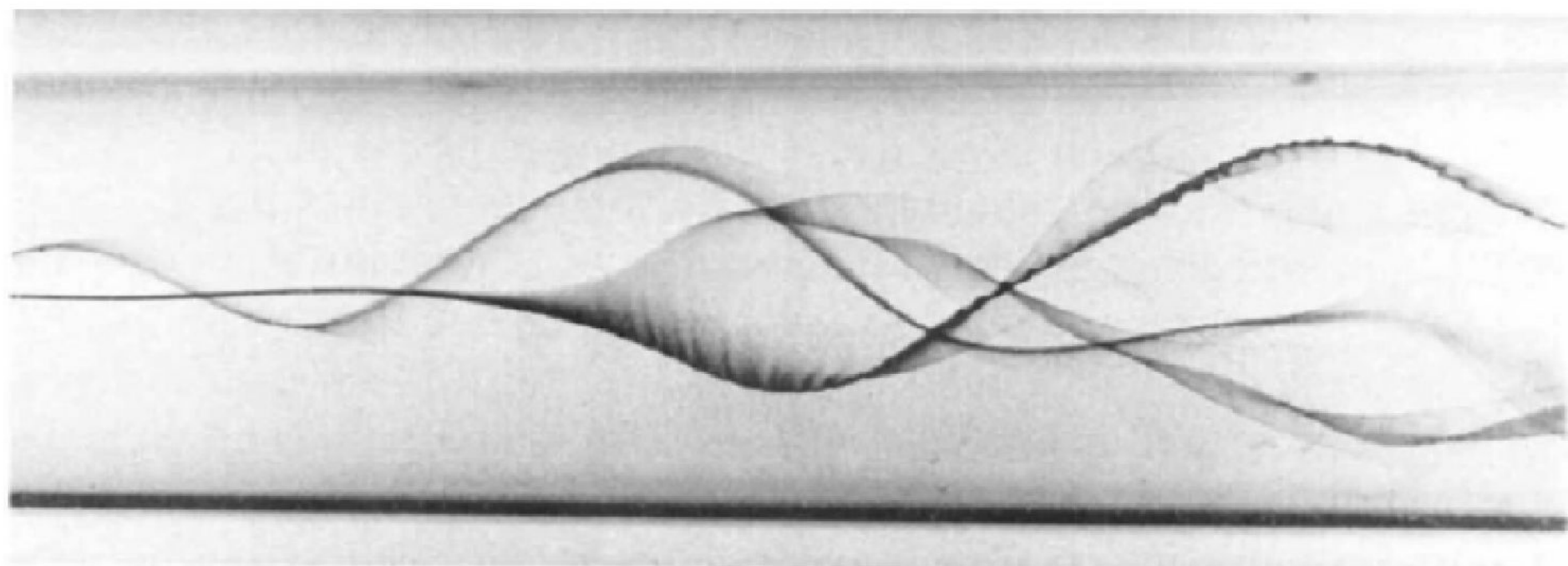
- метод подкрашенных струек тока;
- метод водородных пузырьков.

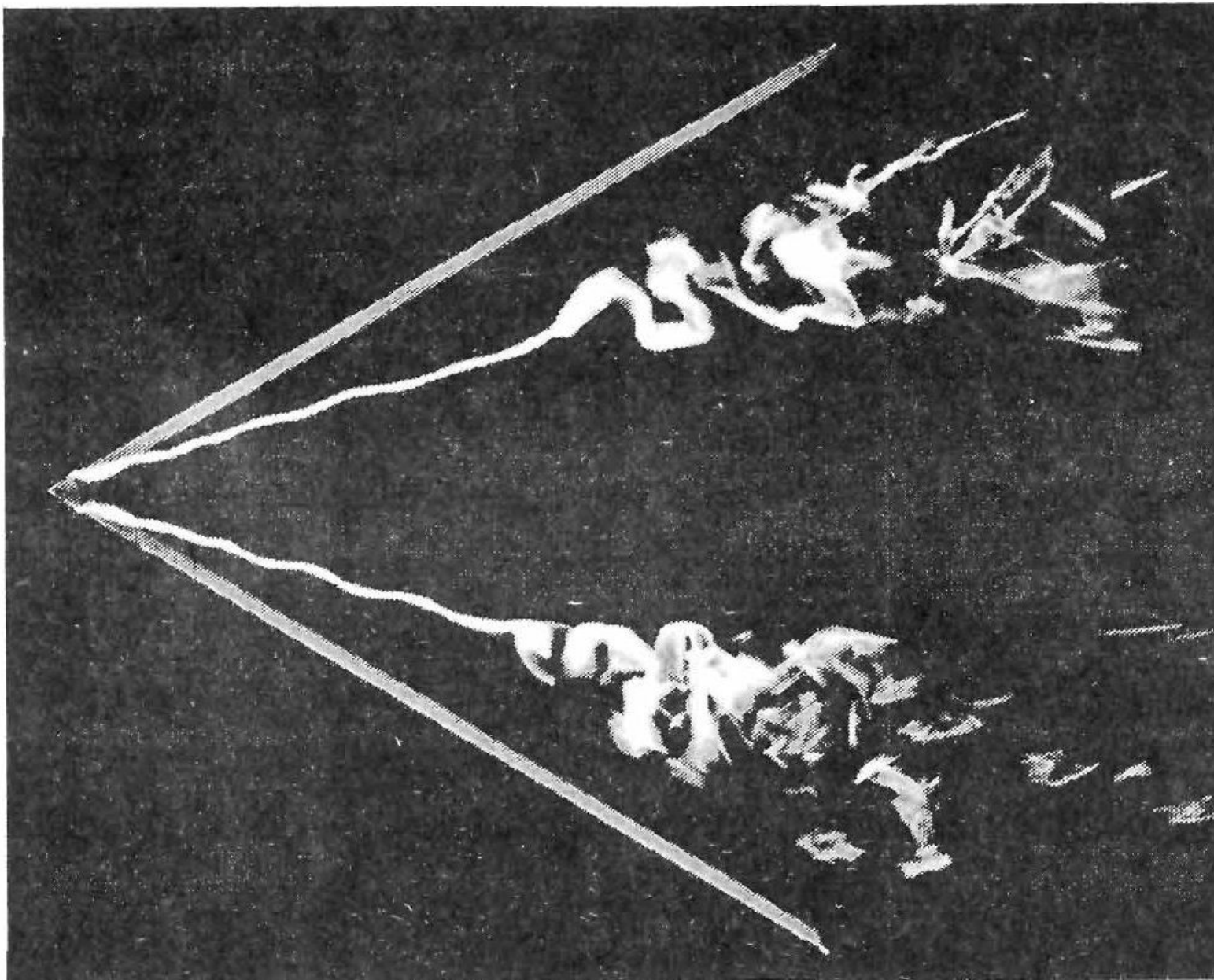
## Визуализация в гидродинамике

### Метод подкрашенных струек

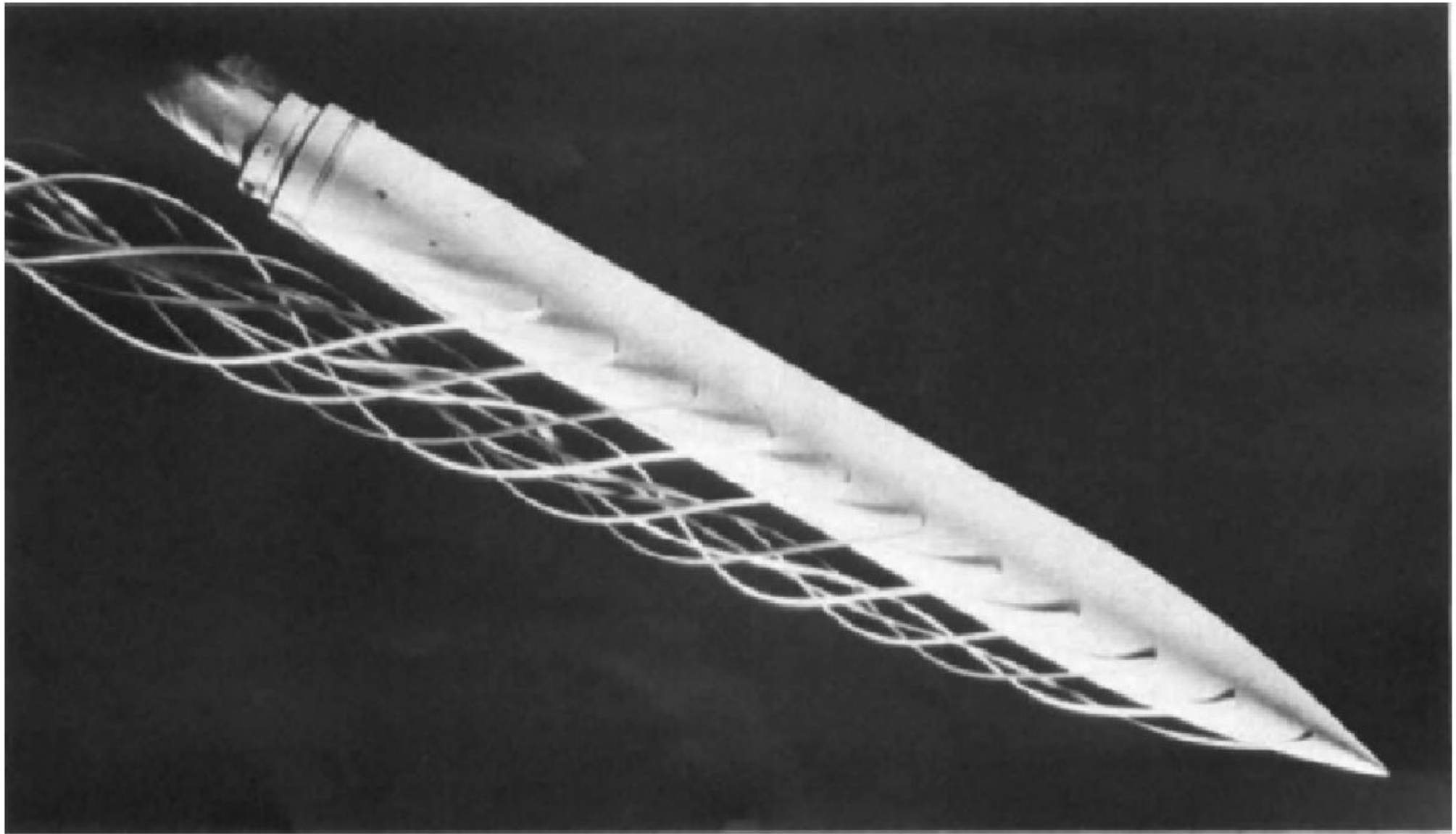


*Рис. 6.1.* Знаменитый эксперимент О. Рейнольдса



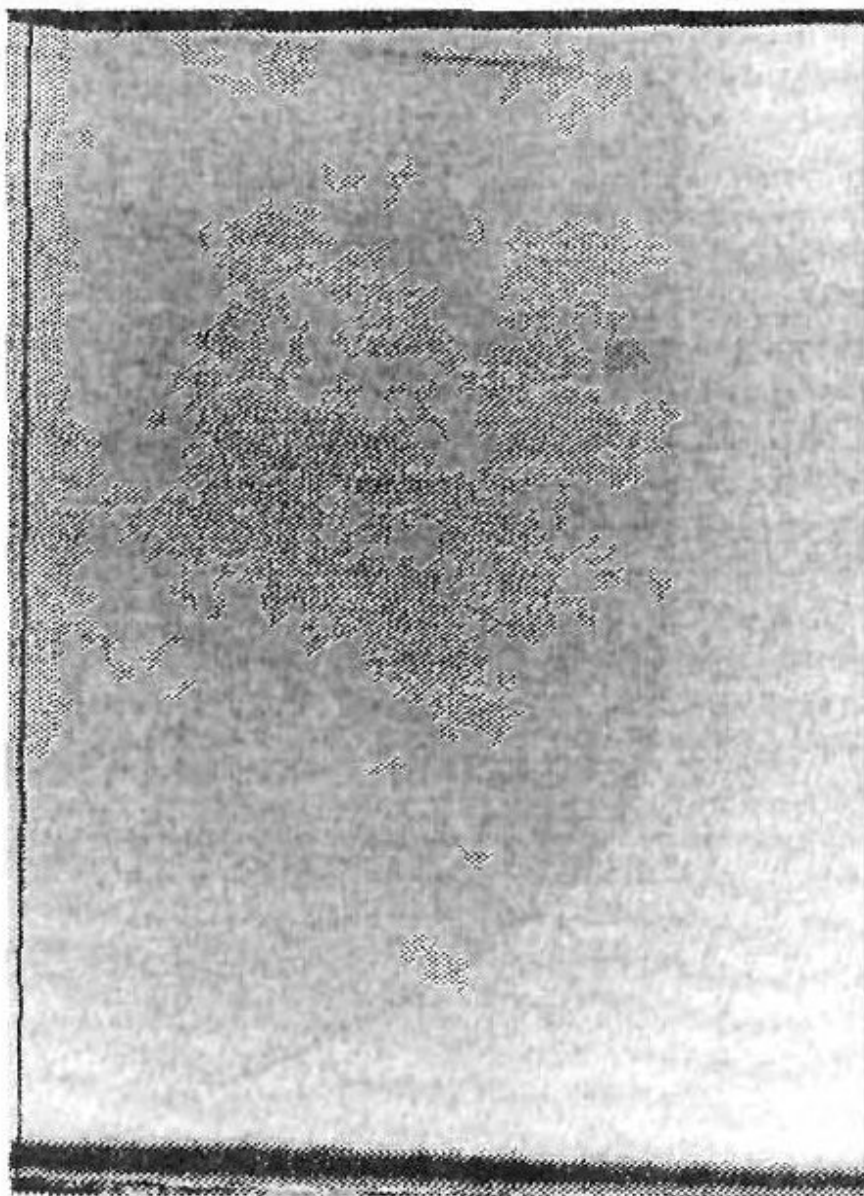


*Рис. 6.2.* Визуализация разрушения вихрей над треугольным крылом

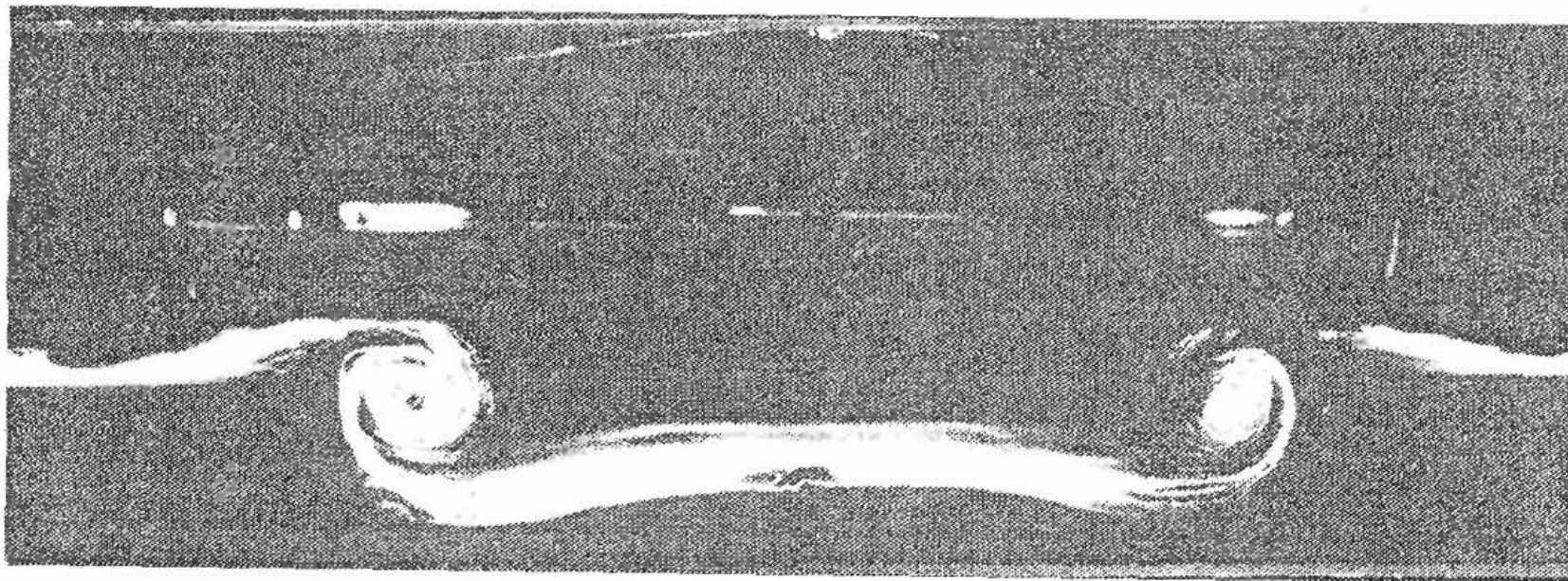


**Fig. 2.2** Dye lines in the vortex flow behind a yawed cylinder. The fluid is water and the dye is a mixture of ink, milk, and alcohol. The color of the original dye lines is red, yellow, and blue. (From Fiechter, 1969.)

## Метод теллуровой проволоки

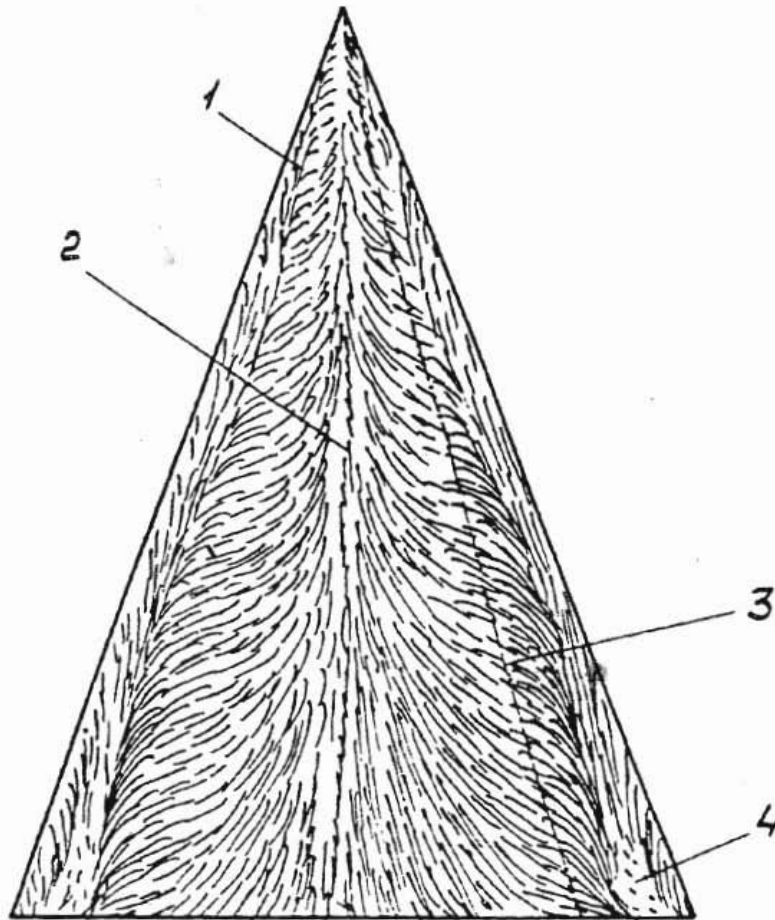


## Метод водородных пузырьков



*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



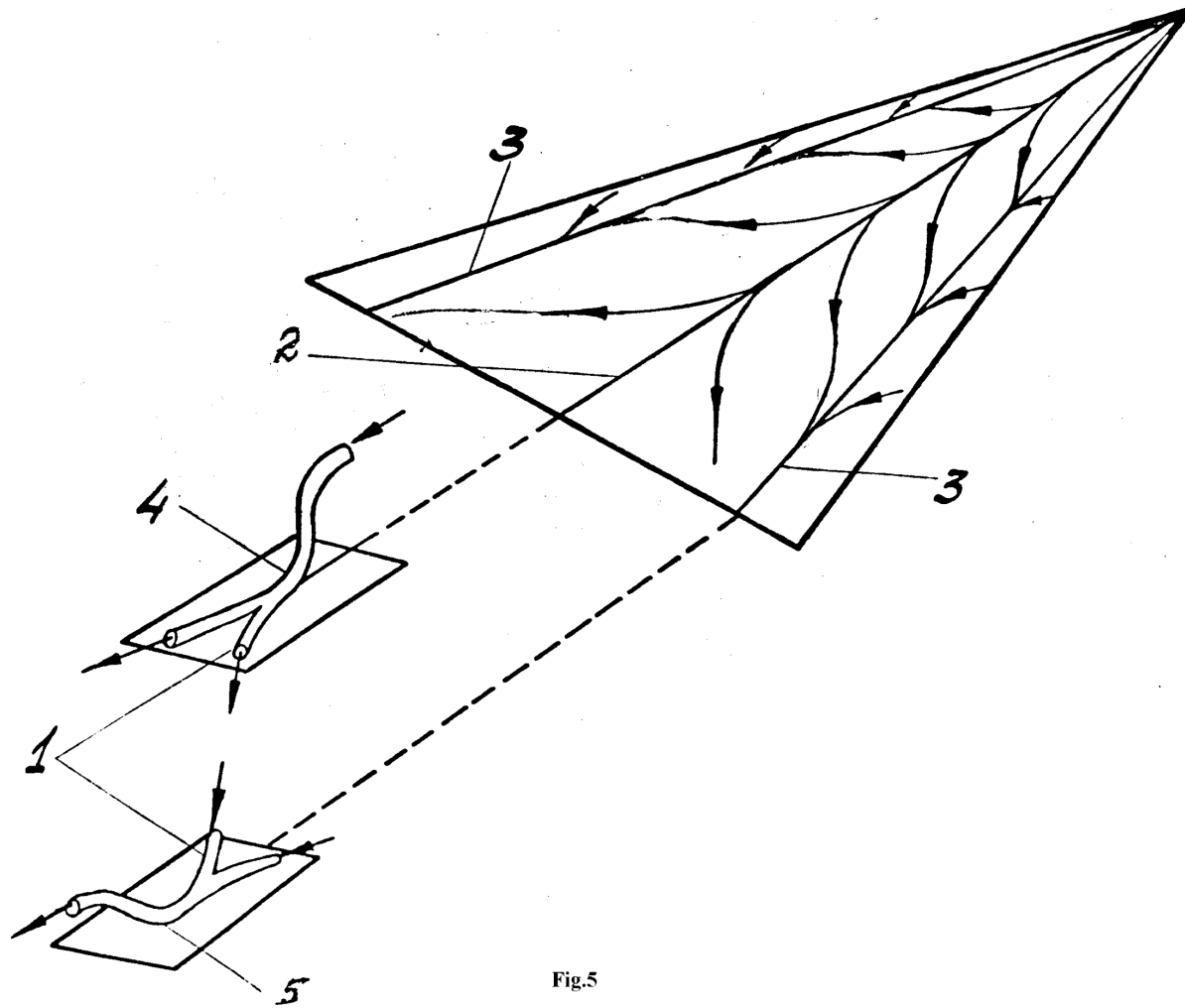


Fig.5

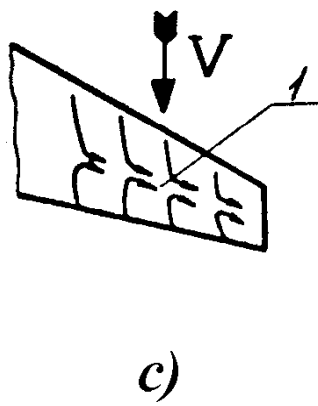
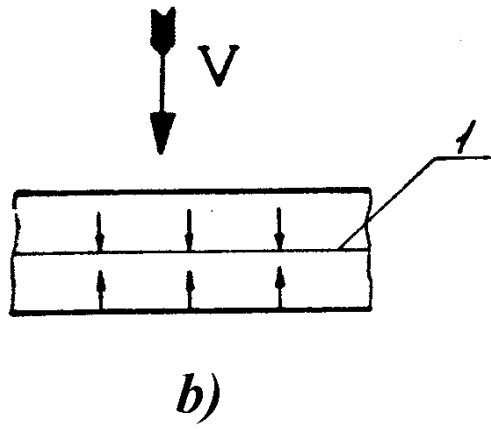
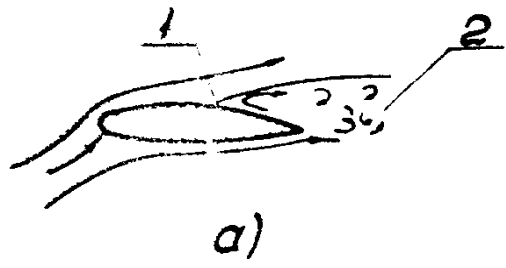


Рис. 1

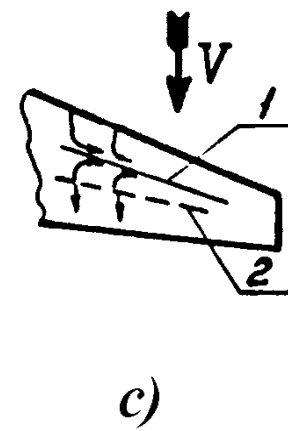
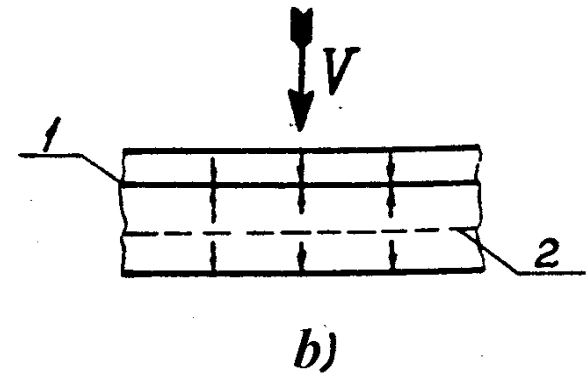
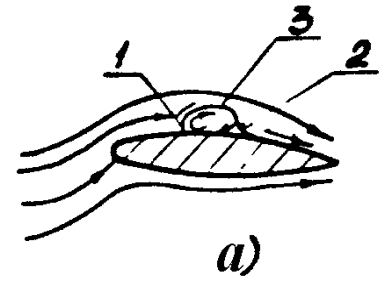


Рис. 2

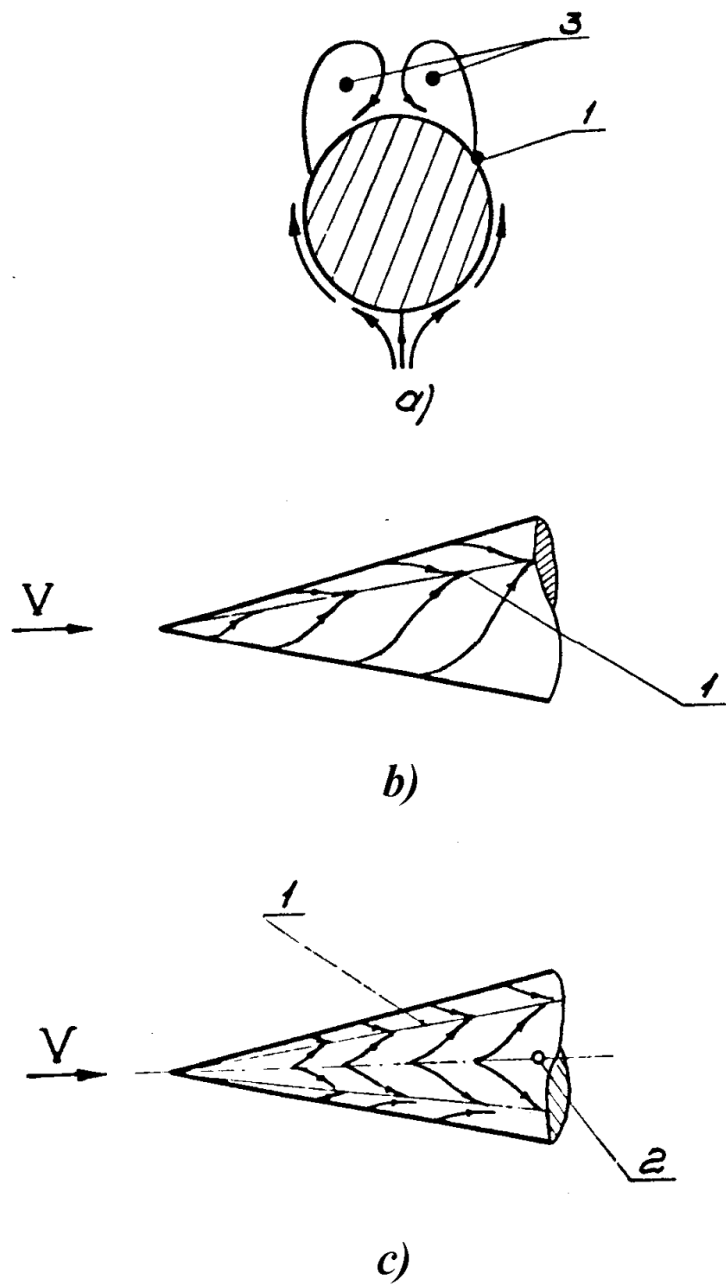


Рис. 6

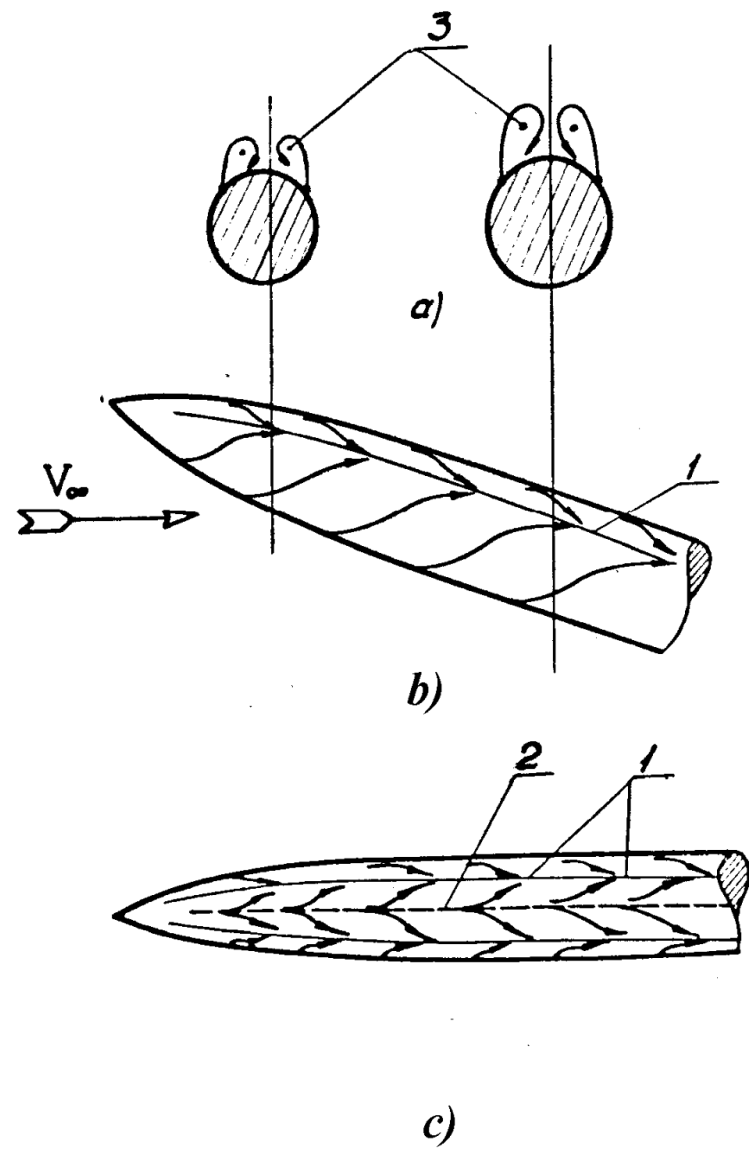


Рис. 7

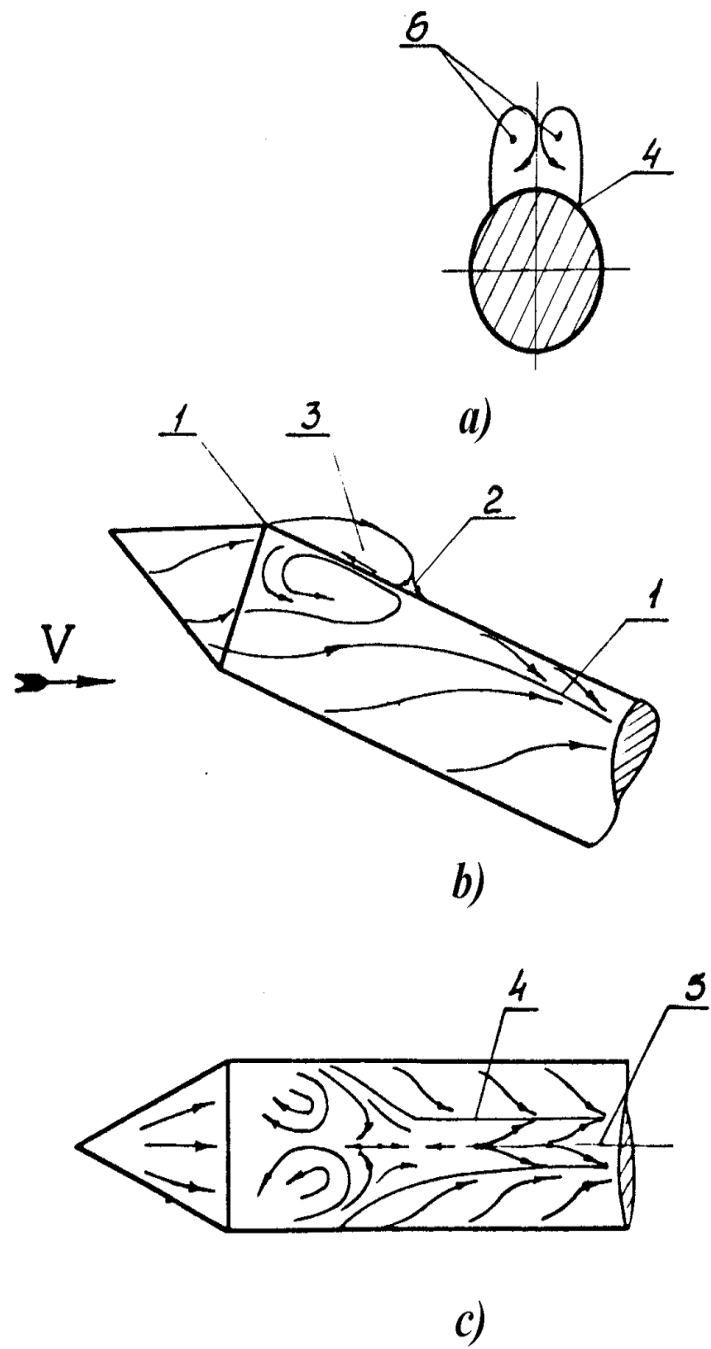


Рис. 8

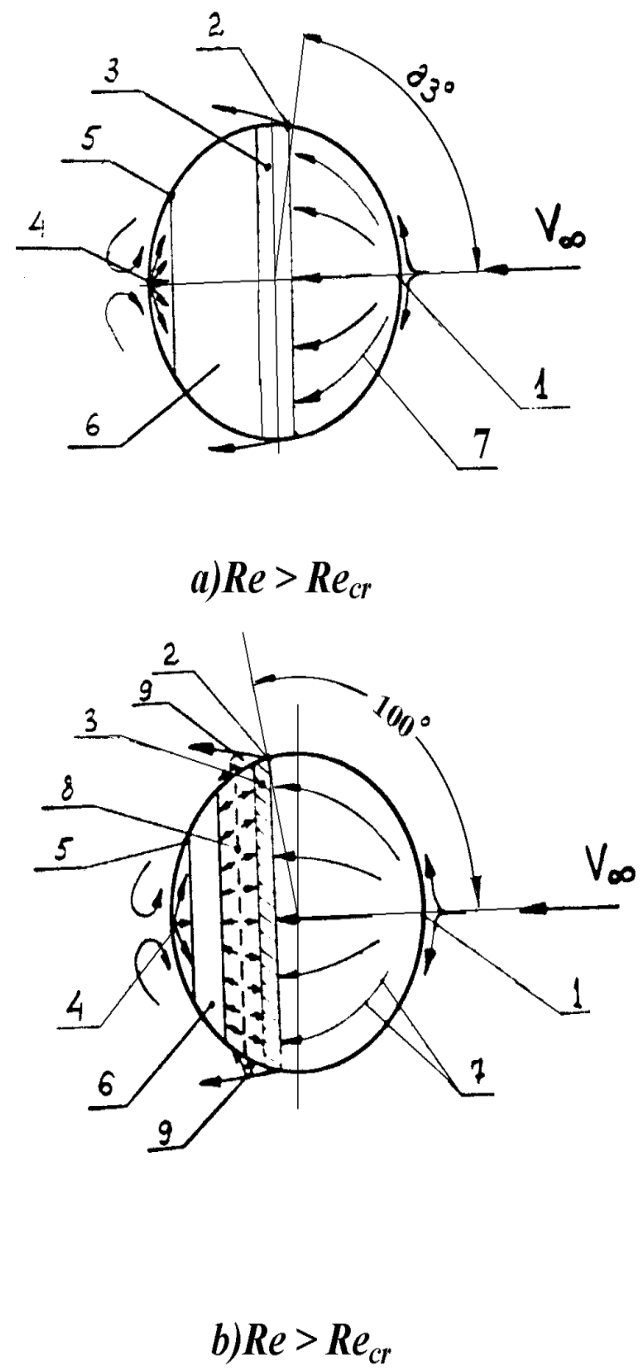
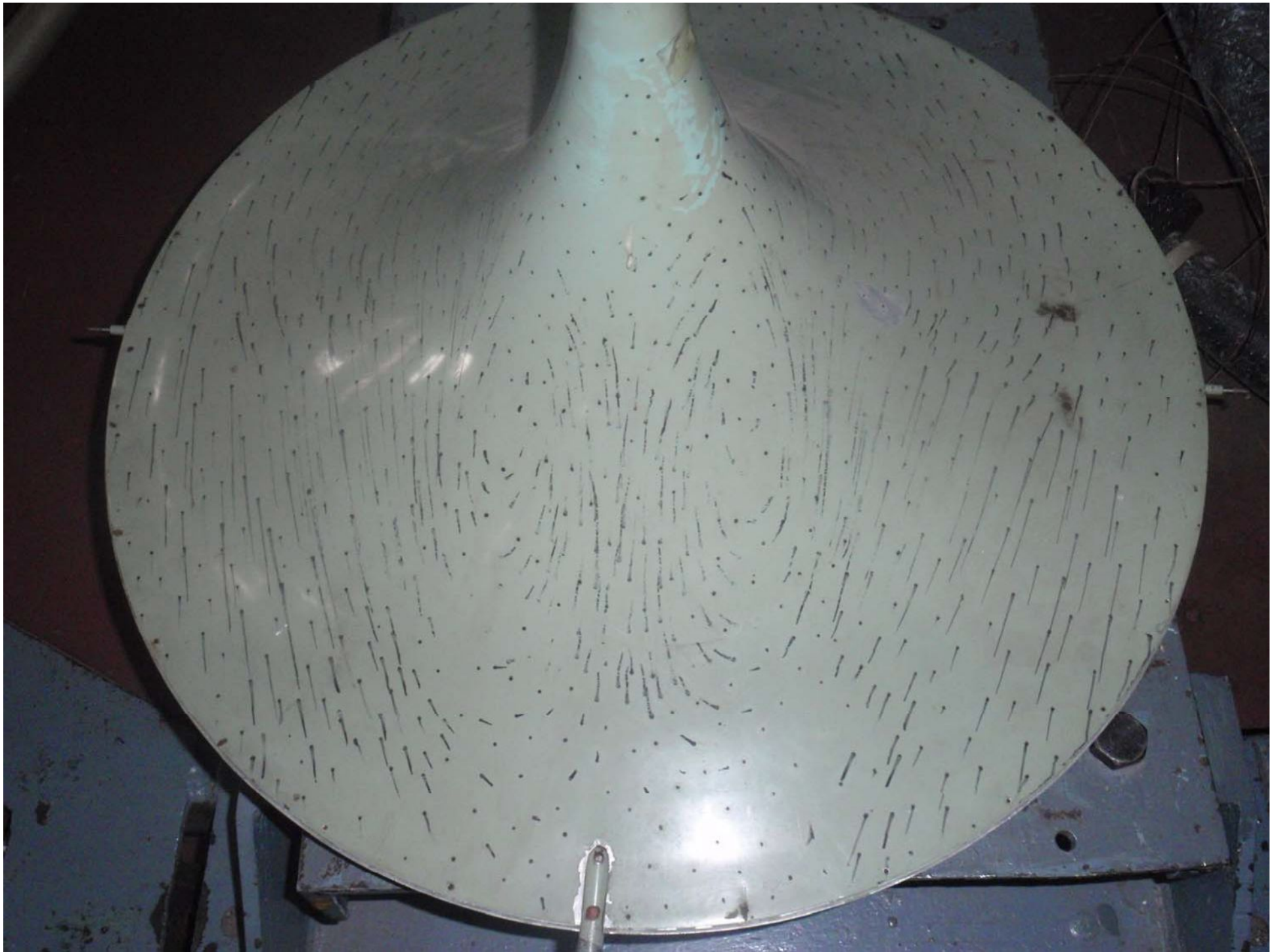
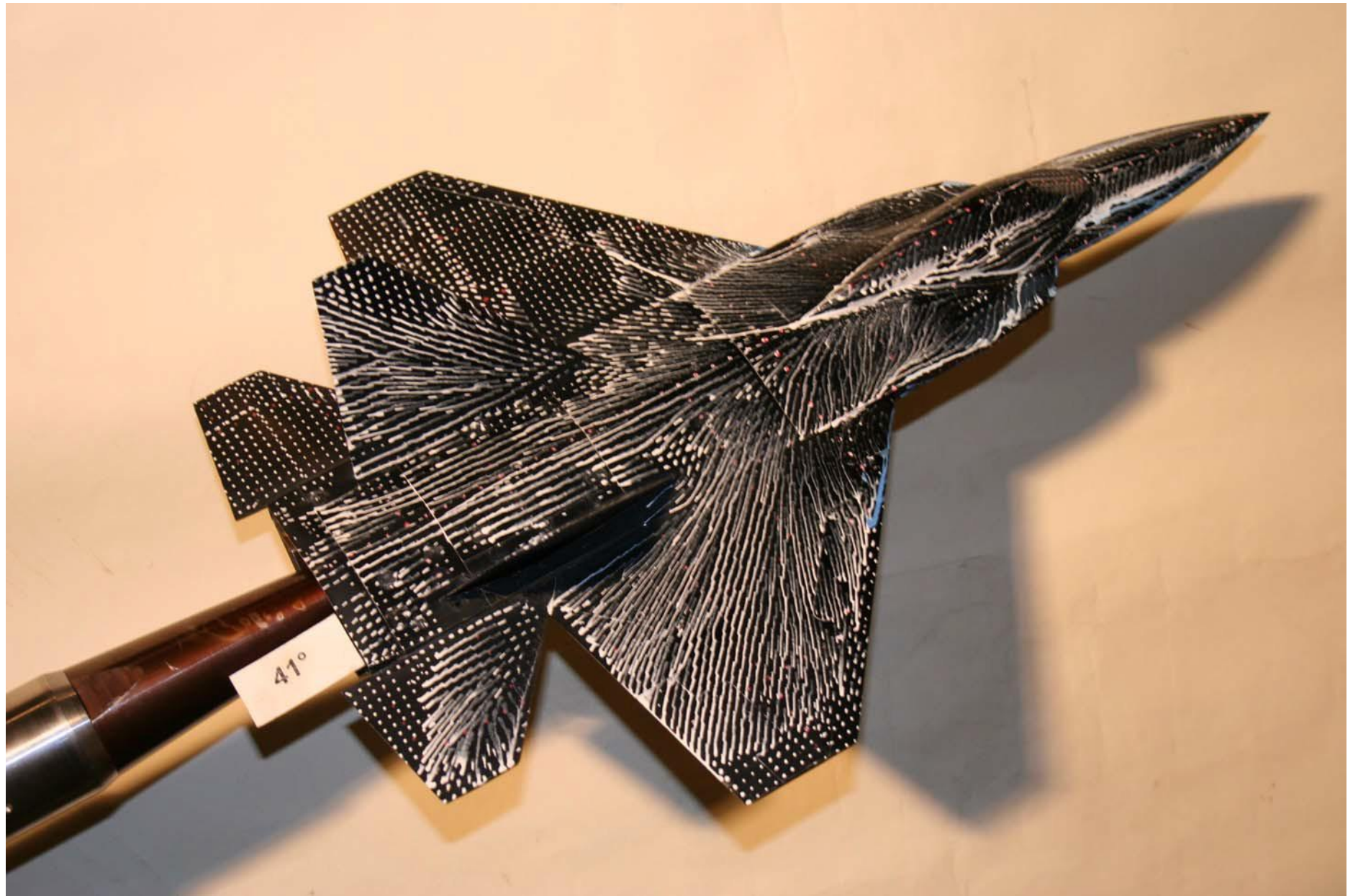
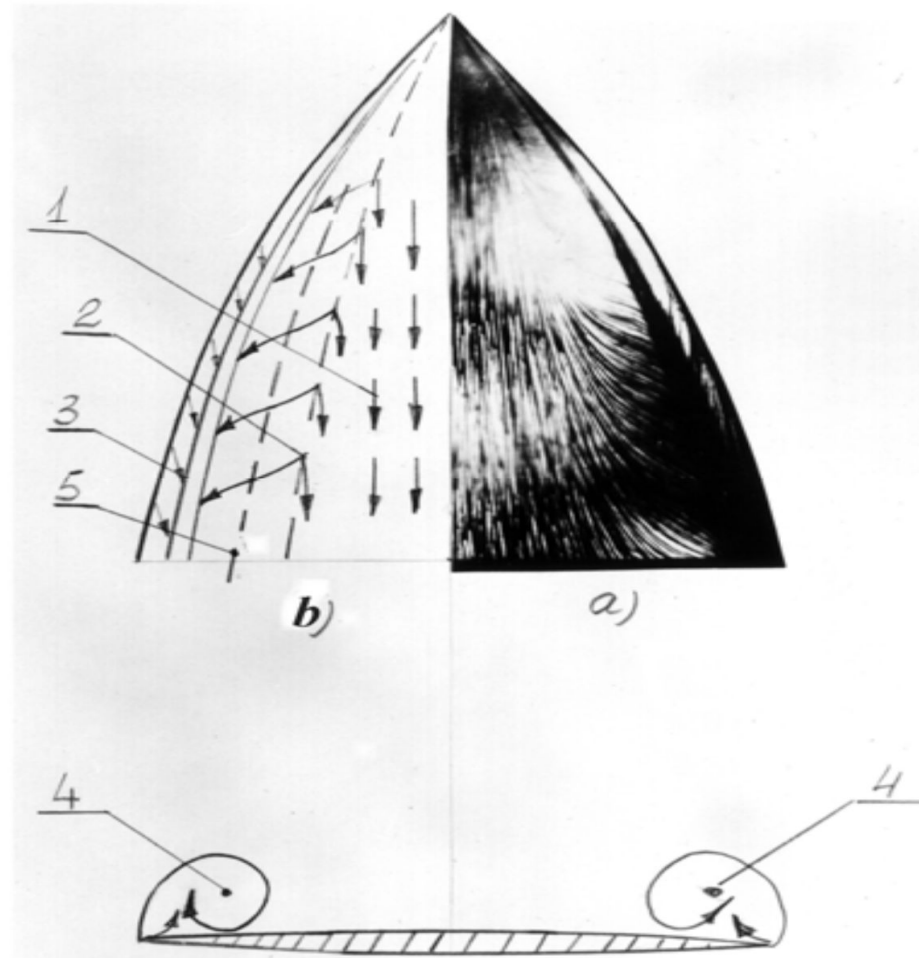


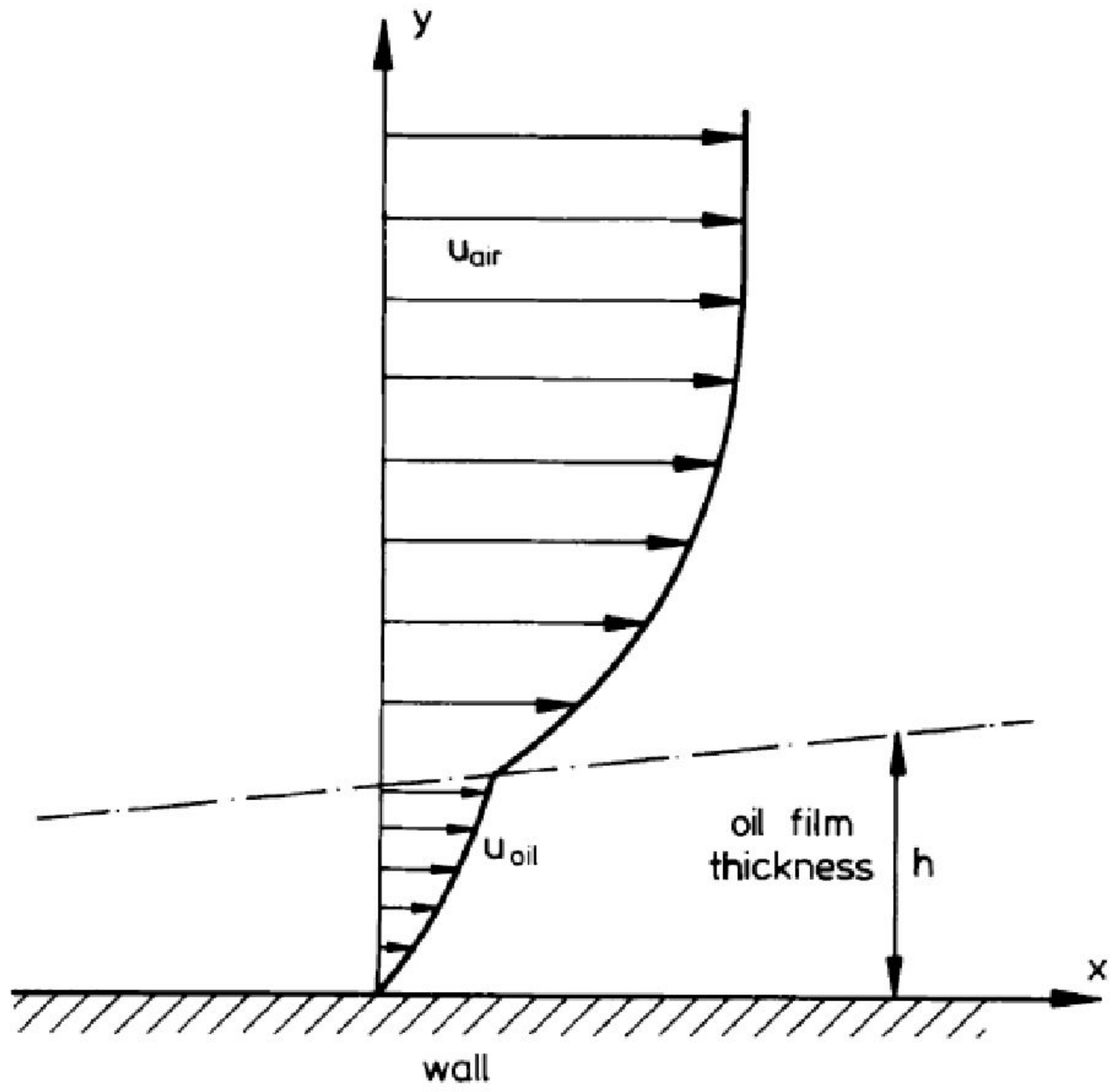
Рис. 9





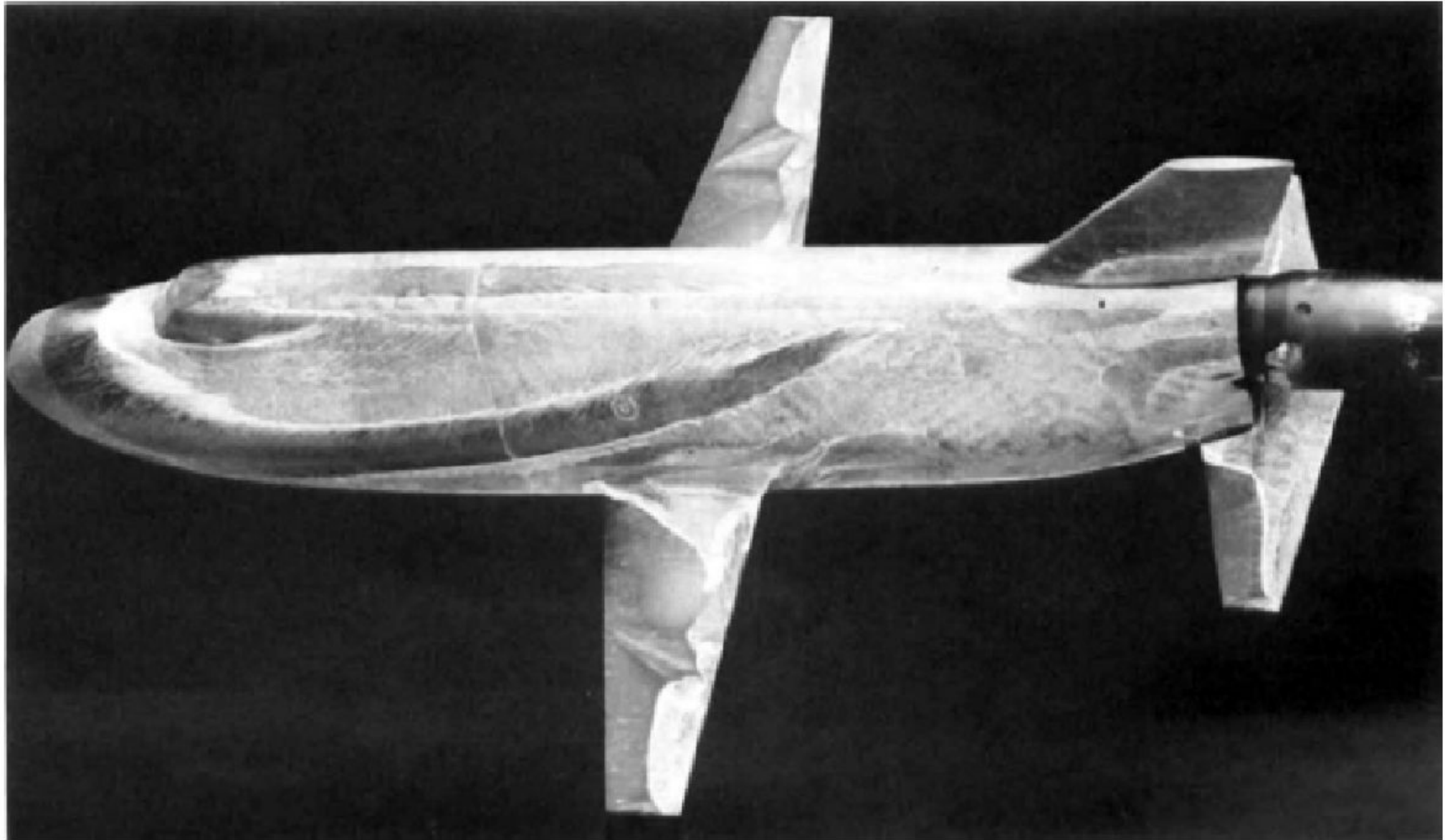
# Метод масляной пленки



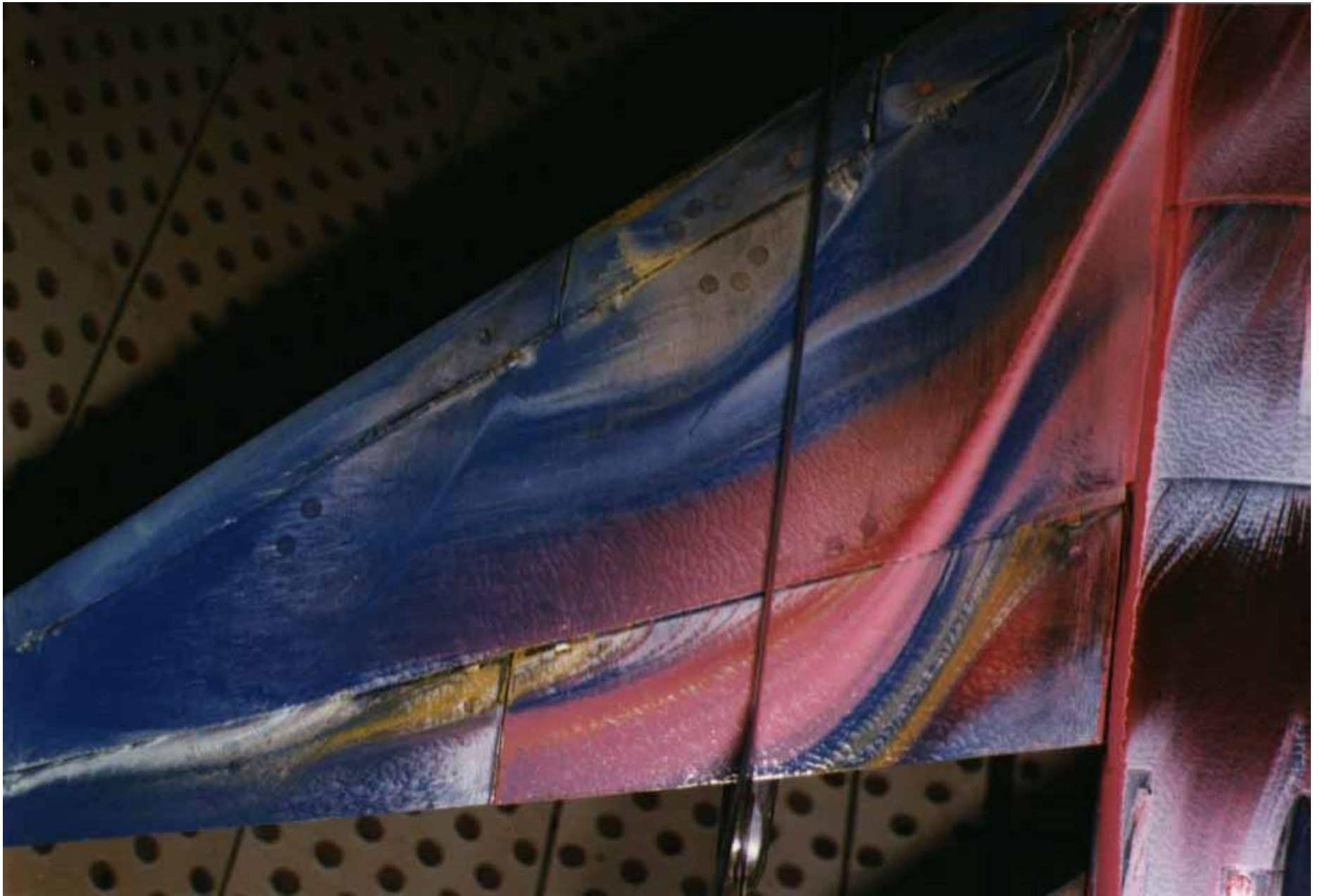


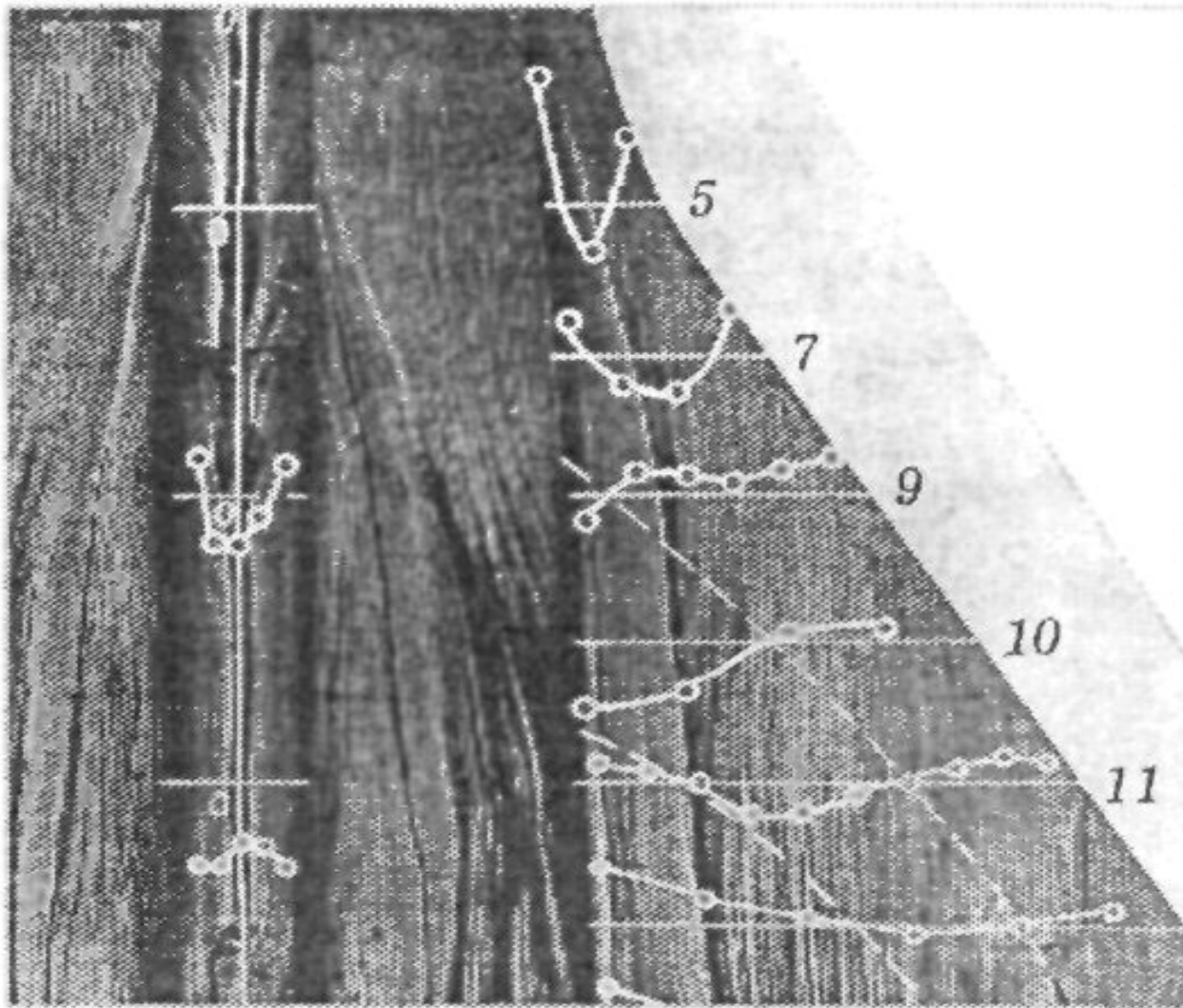
**Fig. 2.43** Velocity profiles in air flow and oil film.





**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

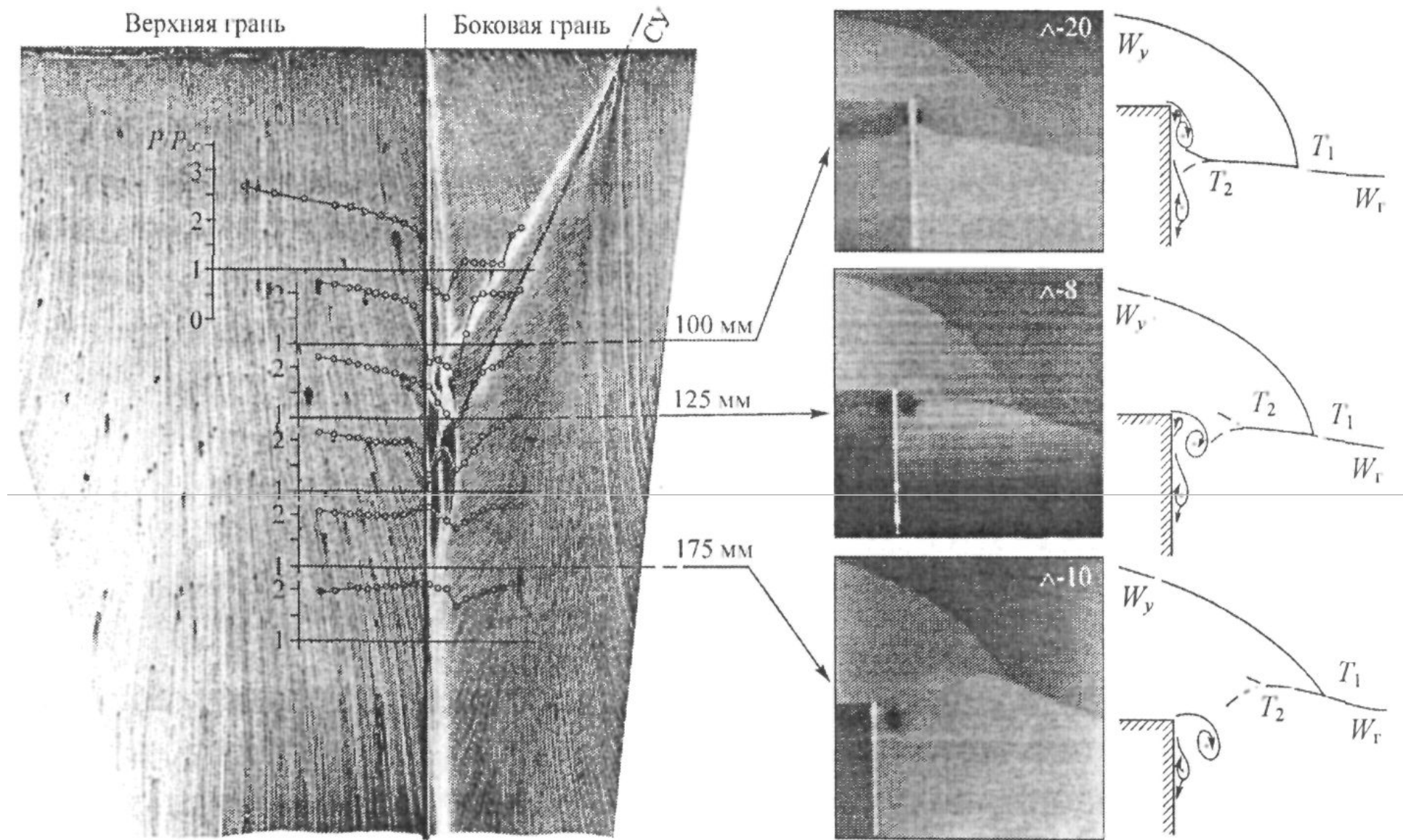


Рис. 6.12. Поверхностные линии тока, распределения давлений и вихреобразование при продольном обтекании внешнего прямого угла

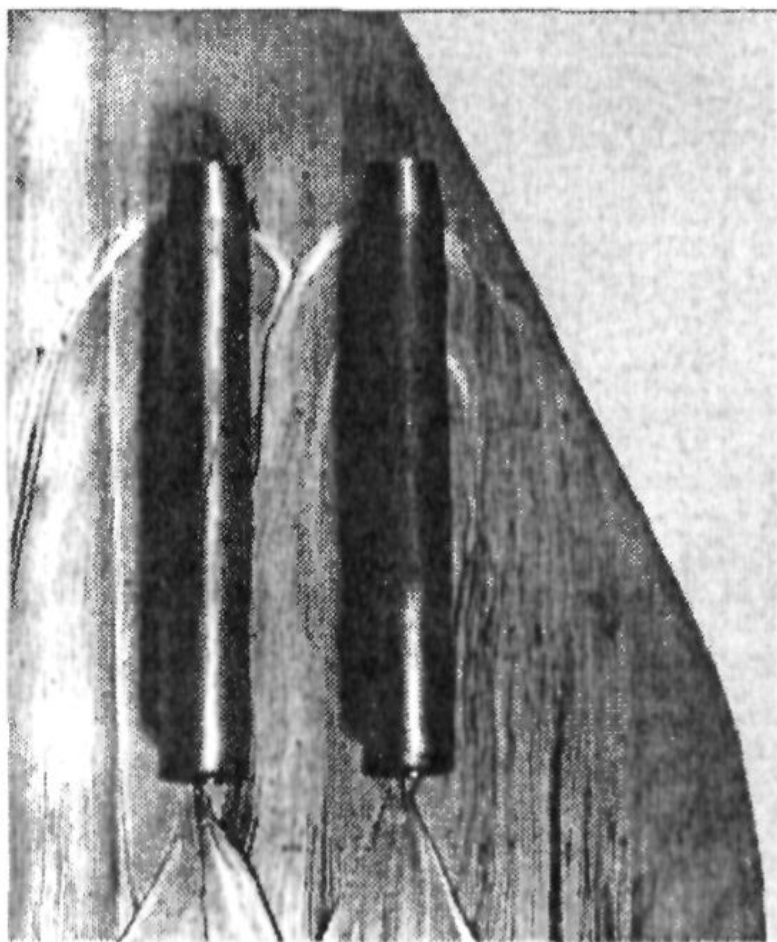


Рис. 6.13. Картина сверхзвукового течения на поверхности крыла с мотогондолами

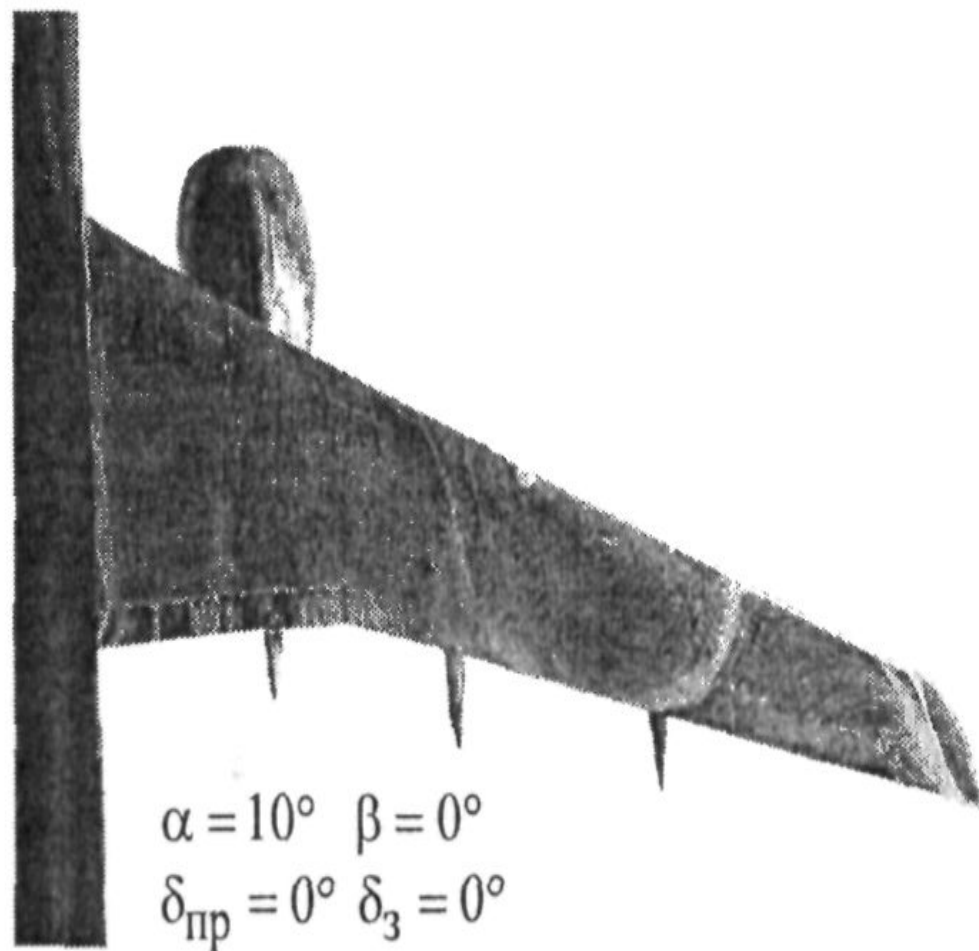
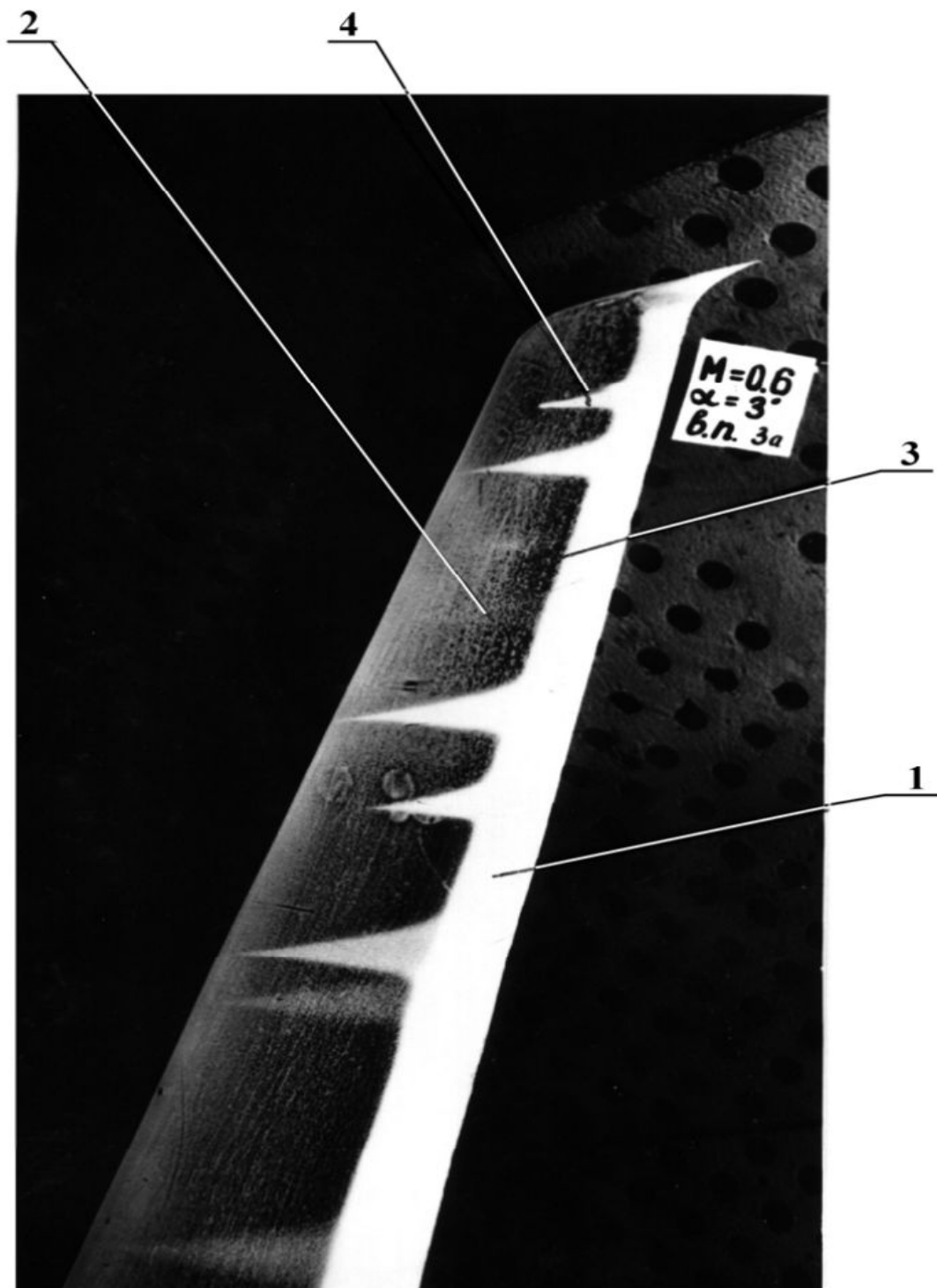


Рис. 6.14. Картина маслосажевой визуализации дозвукового обтекания полу-модели самолёта

Метод каолина



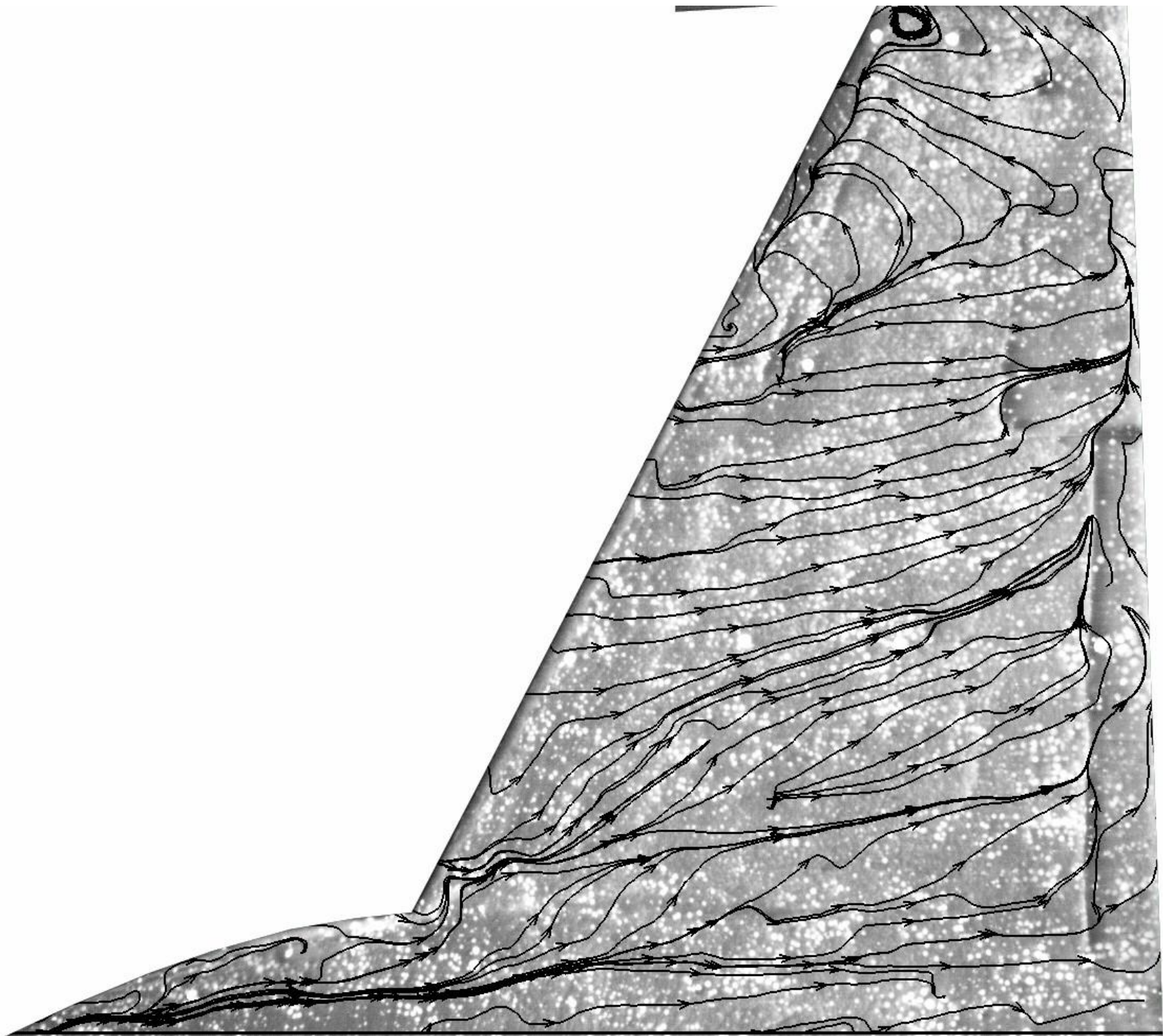


Рис. 17 Предельные линии тока,  $V=50\text{ м/с}$ ,  $\alpha=10^\circ$

**Метод  
шелковинок**

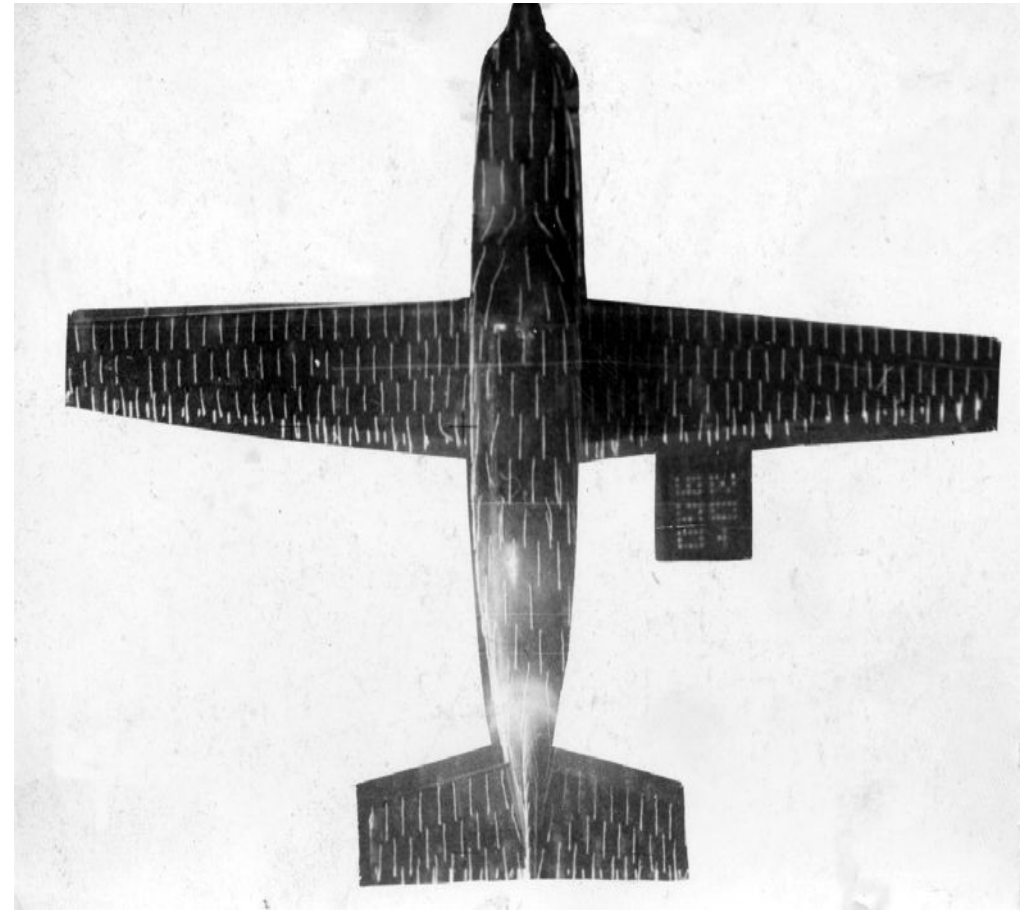
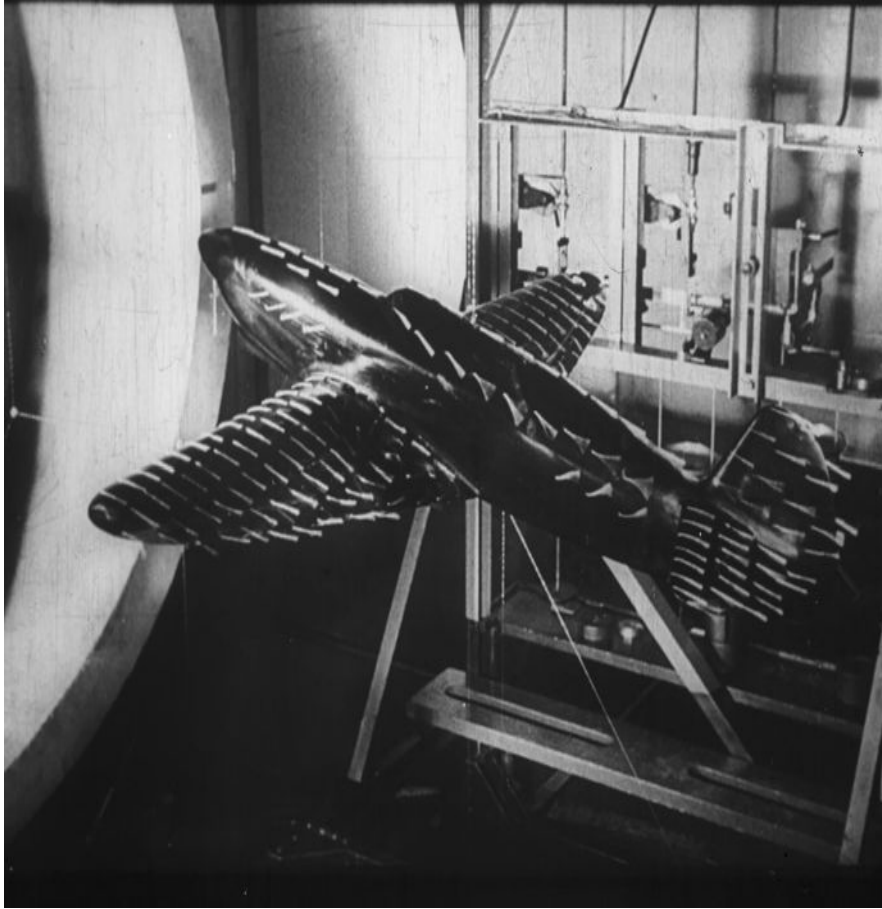
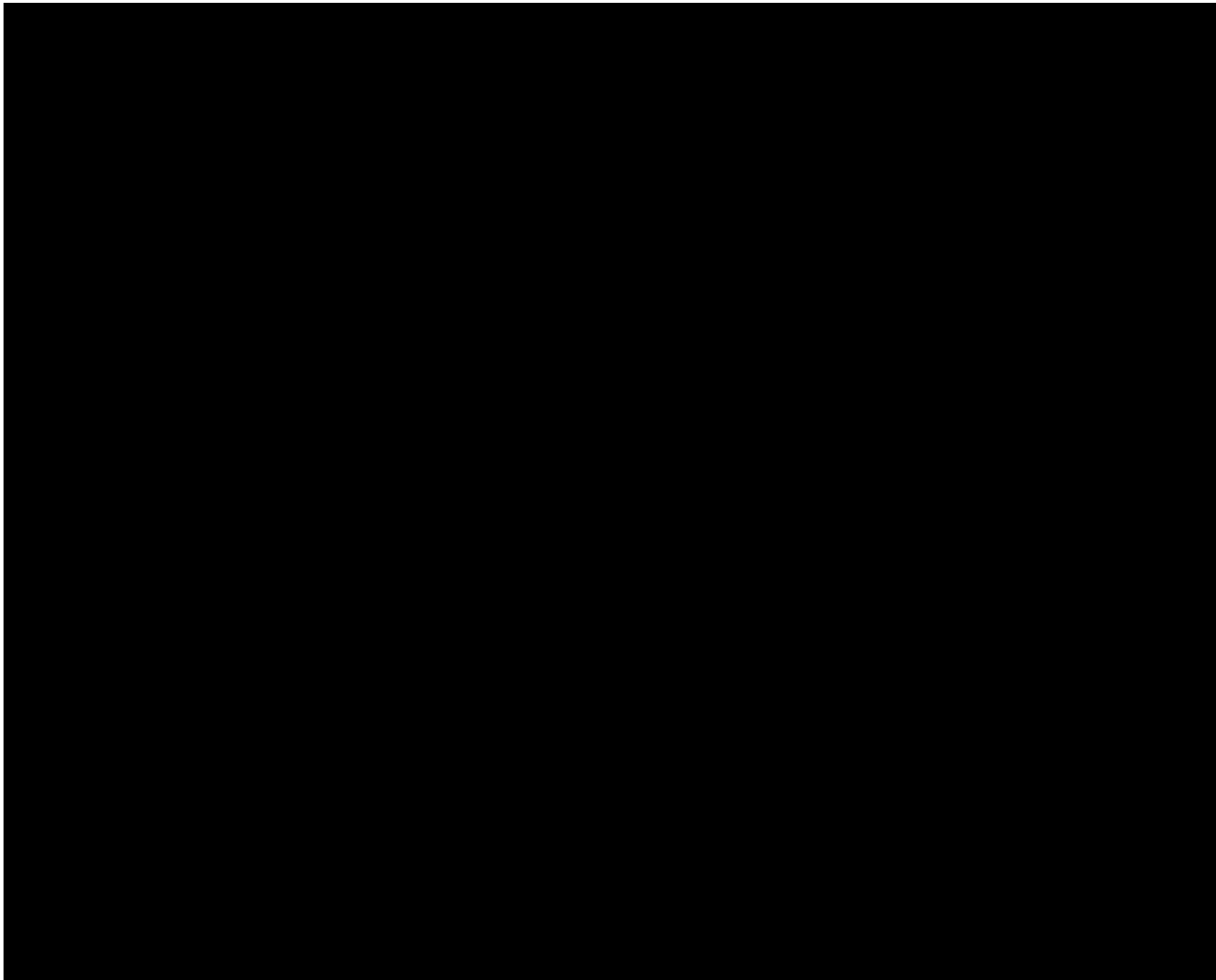
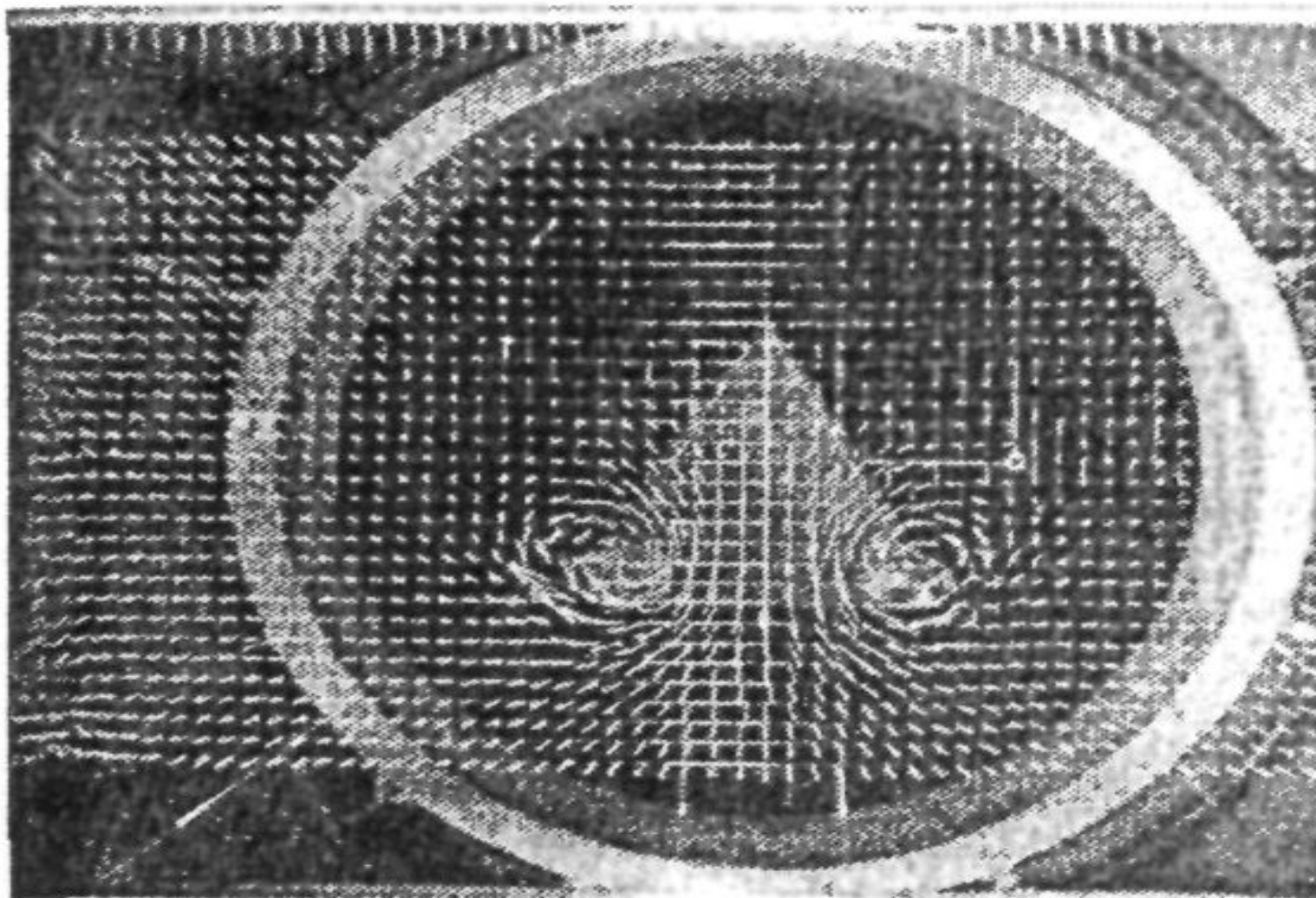


Рис 10

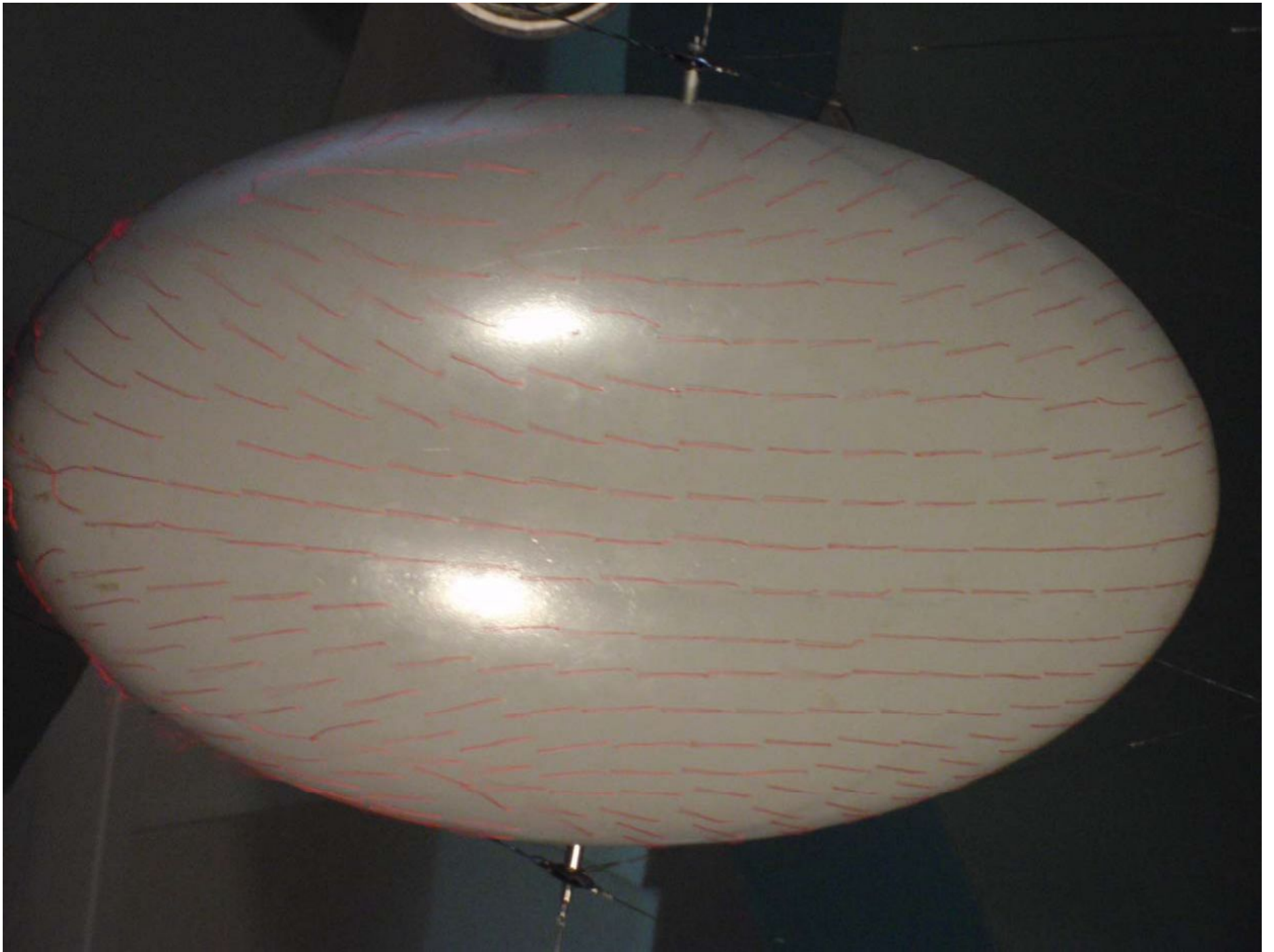


## Визуализация методом шелковинок в АДТ Т-1 МАИ





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



$\alpha = 30^\circ$

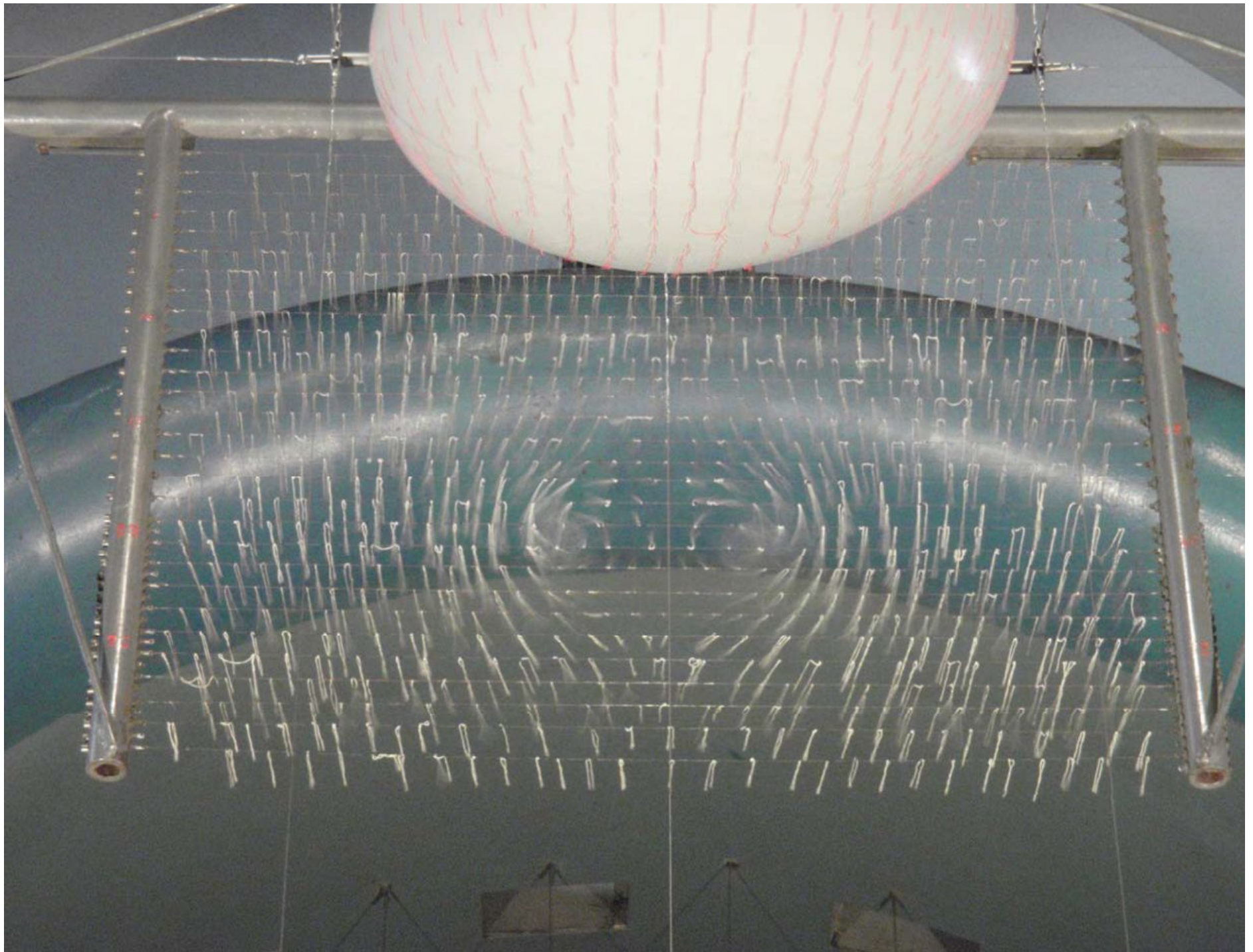


Рис. 3.32  $x_{\text{экр}} = 720$  мм

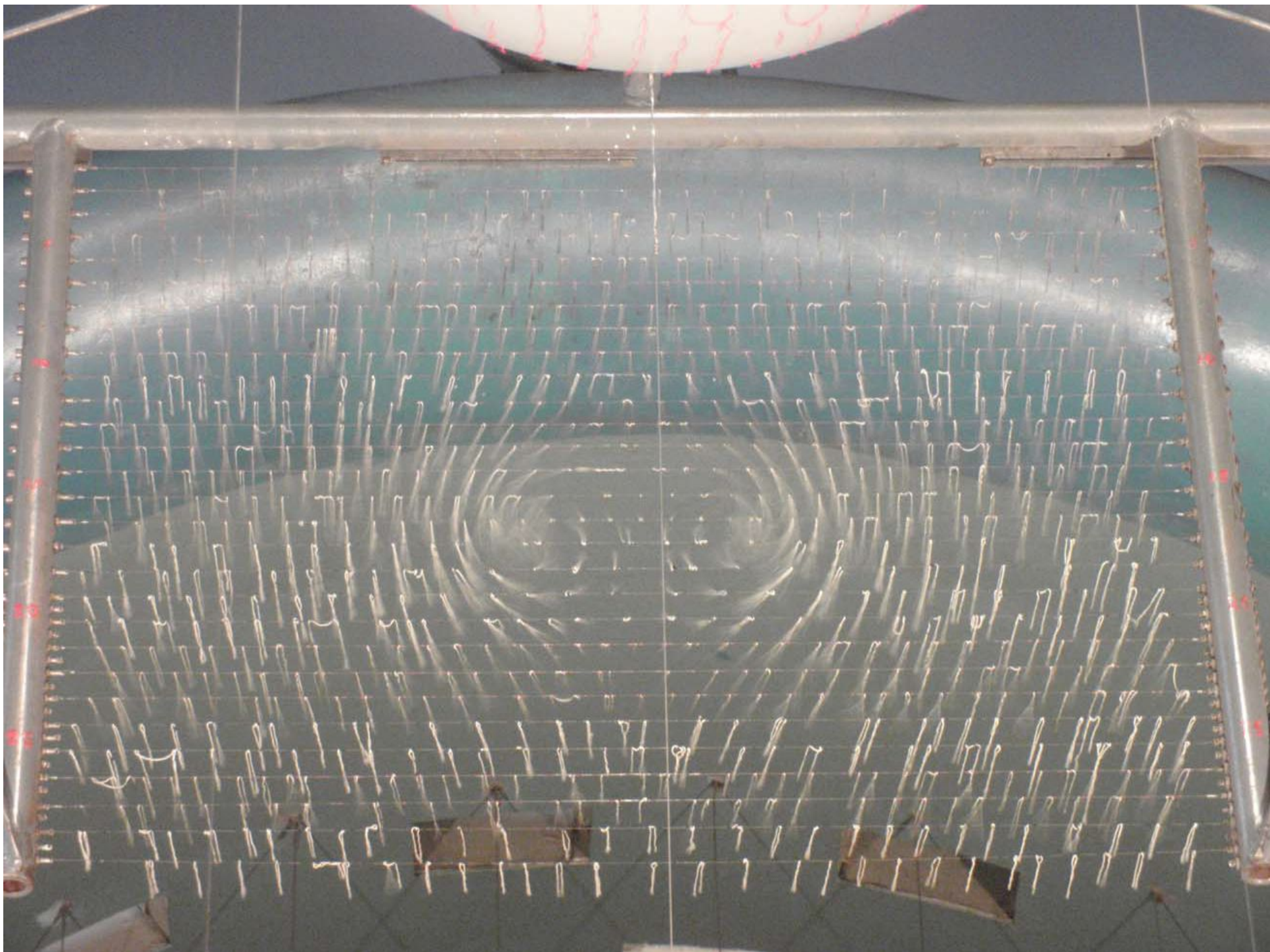


Рис. 3.33  $x_{\text{экр}} = 970$  мм



Рис. 11

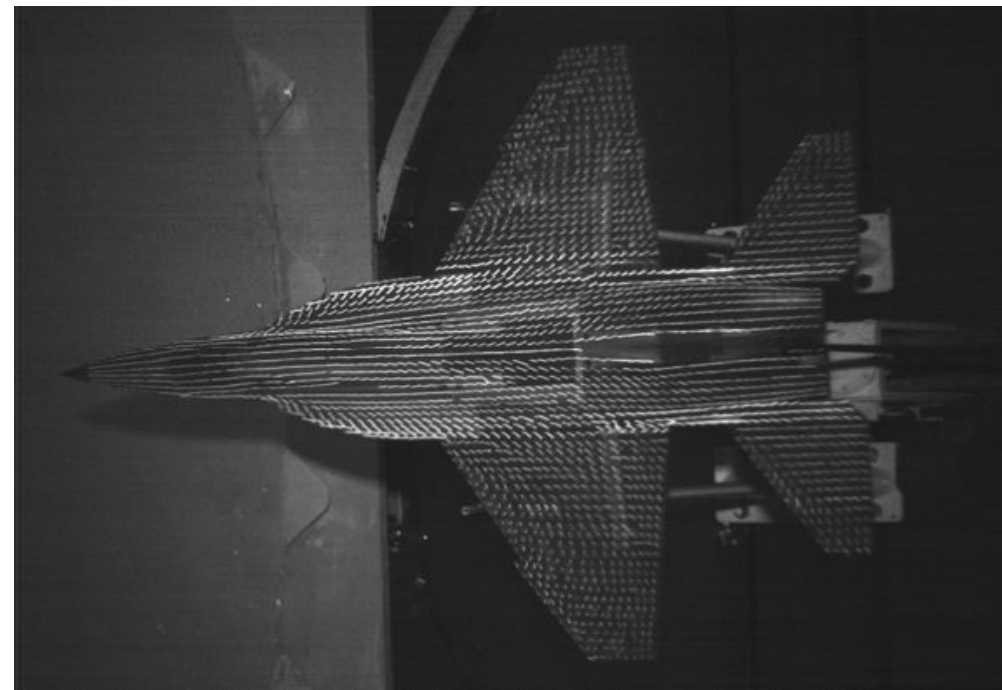
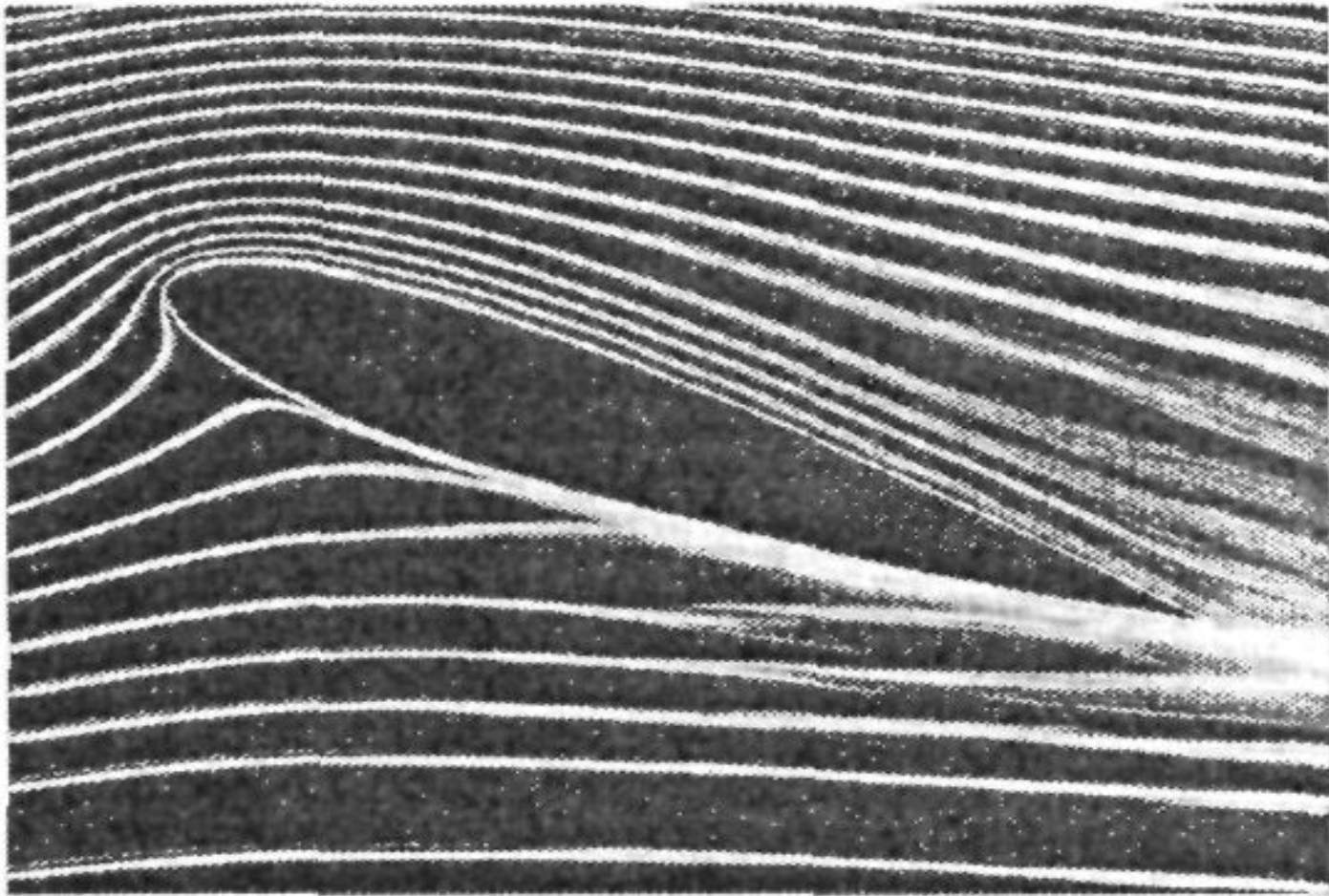
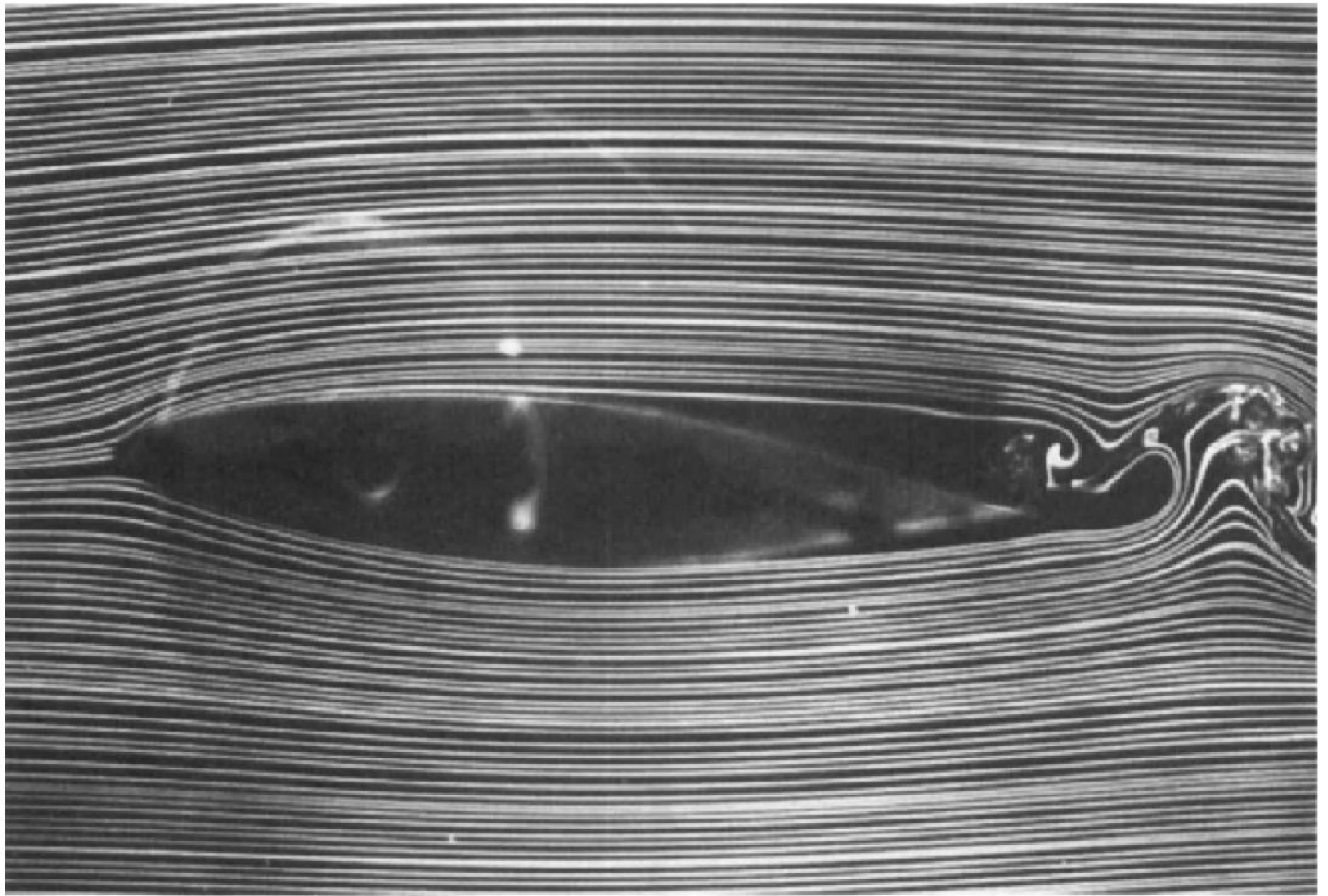


Рис. 12

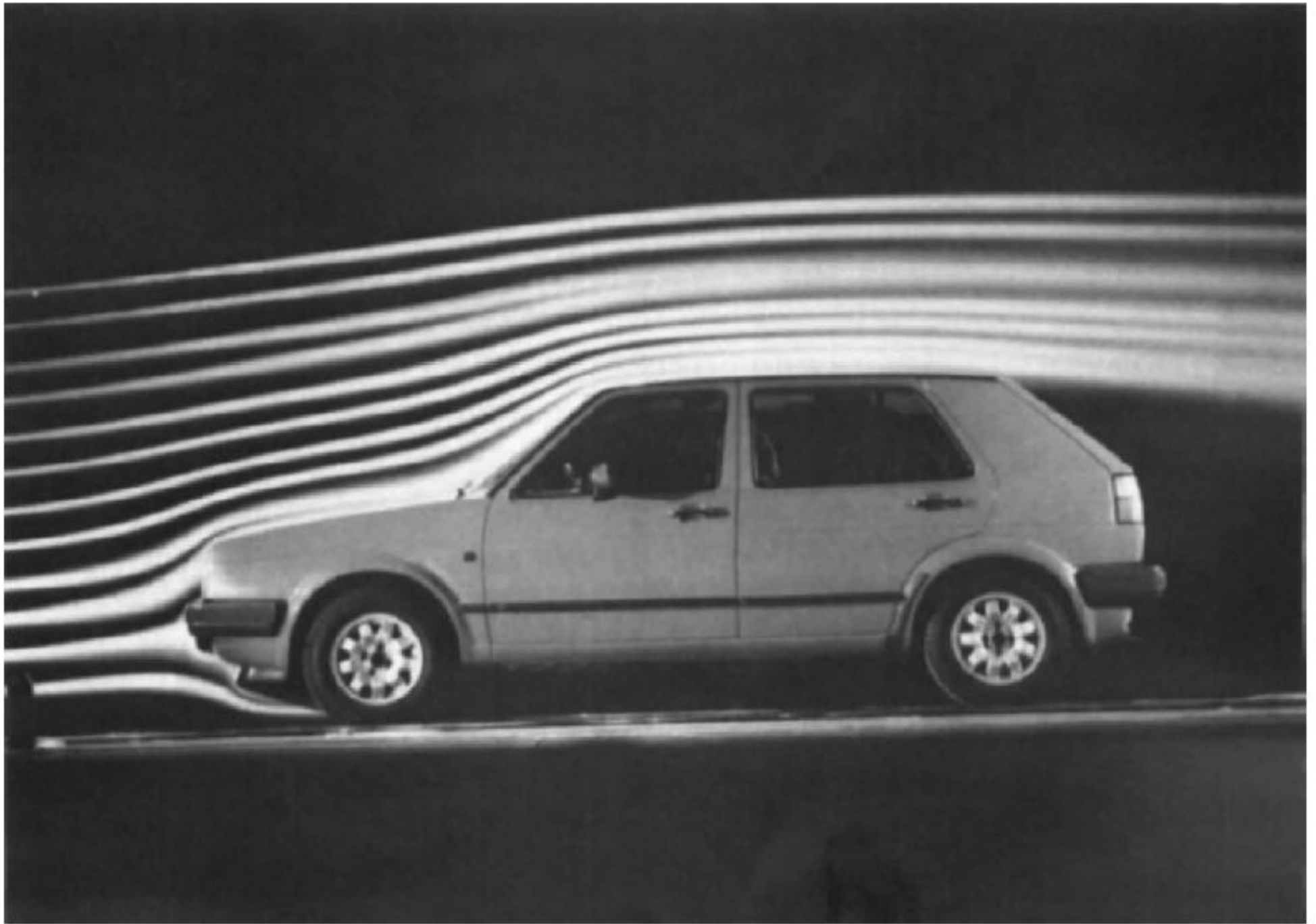


*Рис. 6.6. Дымовые линии тока при обтекании модели крыла в аэродинамической трубе [163]*

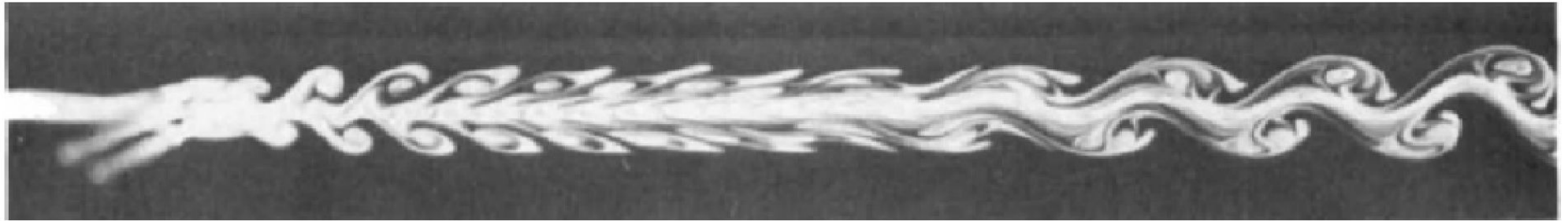


**Fig. 2.11** Smoke lines around an airfoil in low Reynolds number wind-tunnel flow. (From Mueller and Batill, 1981.)





**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  $Re \cong 100$ . (From Zdravkovich, 1968.)

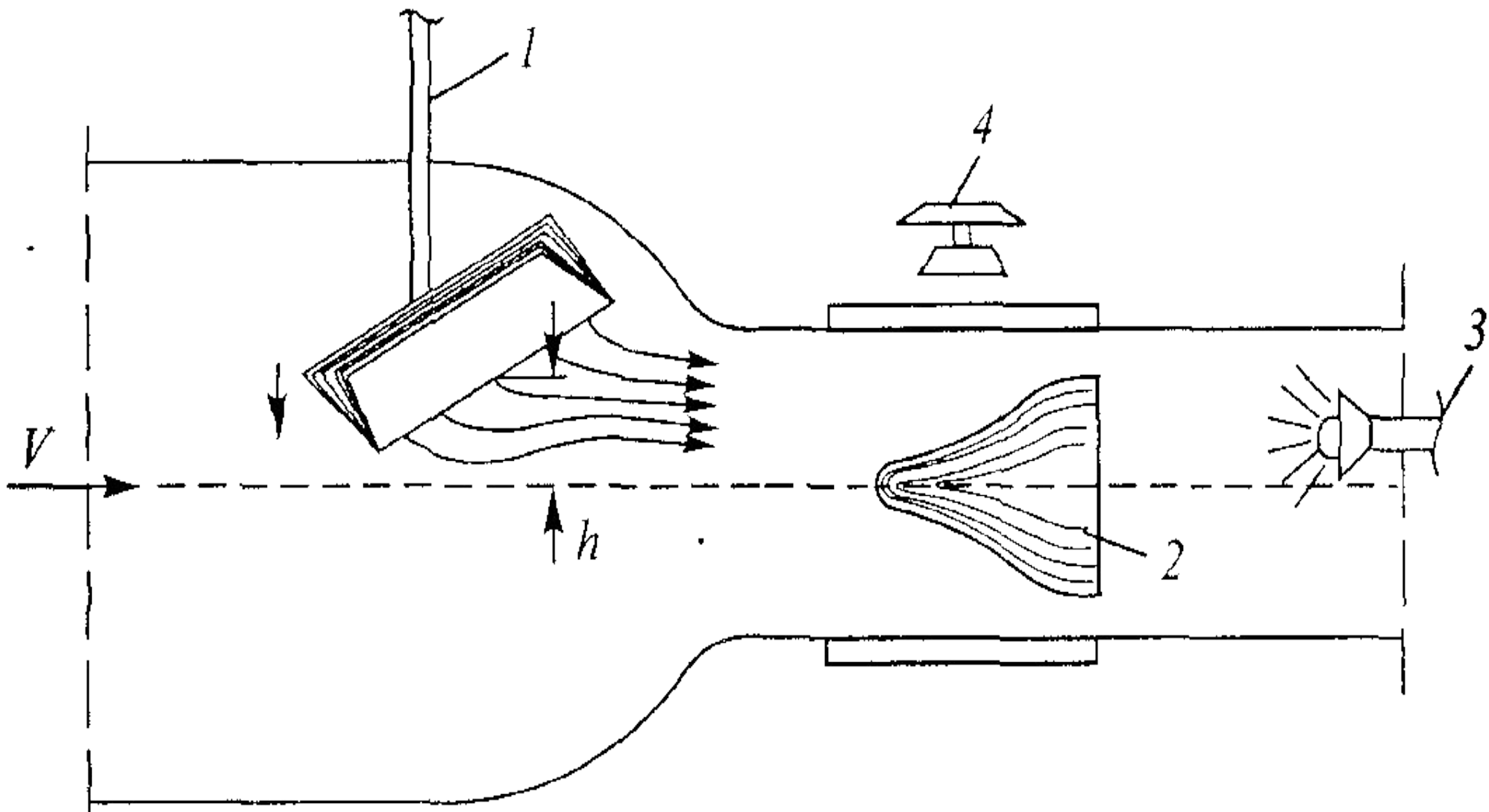
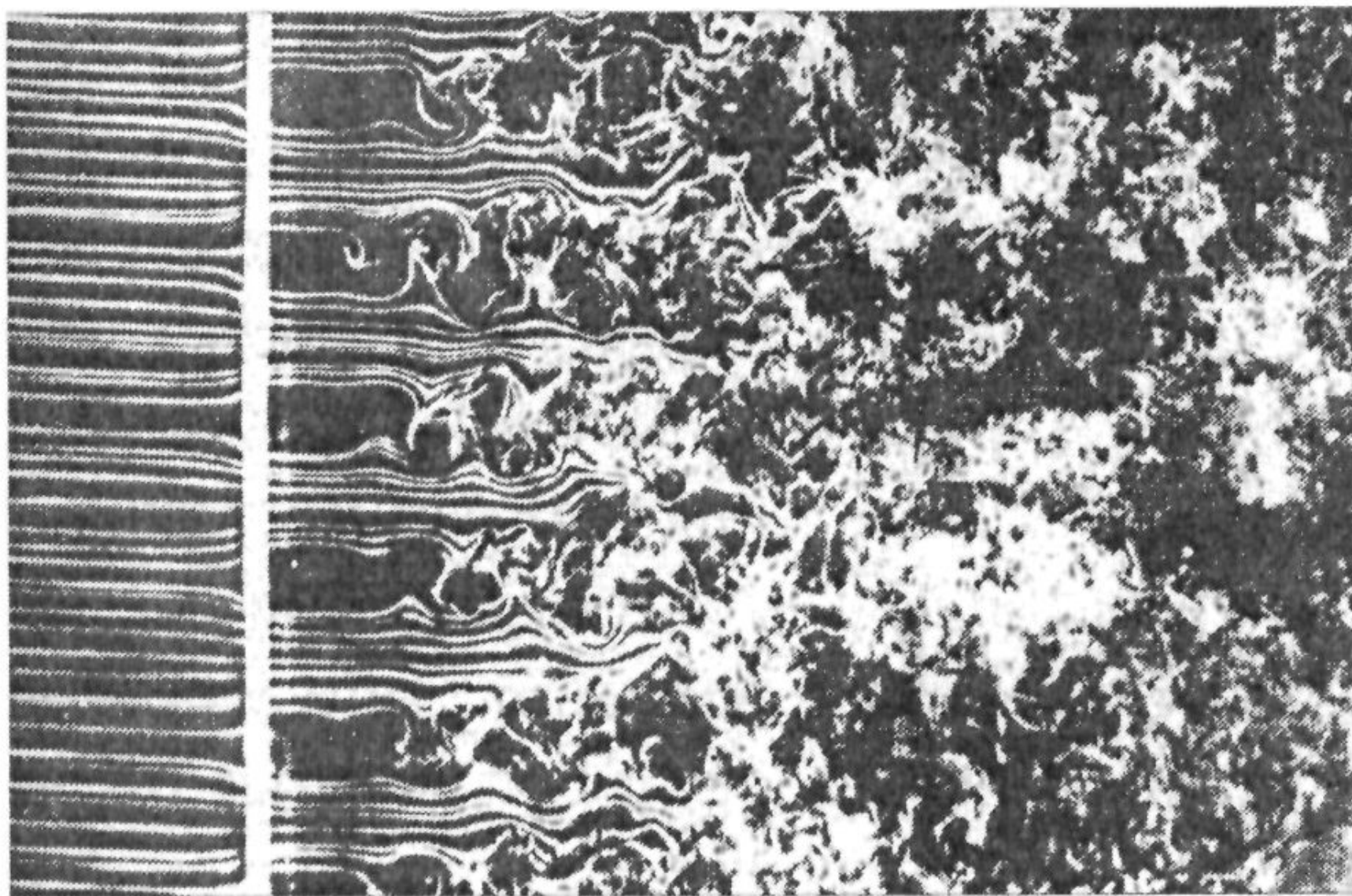


Рис. 6.7. Схема метода дымящейся проволочки



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

## Метод стробоскопической визуализации

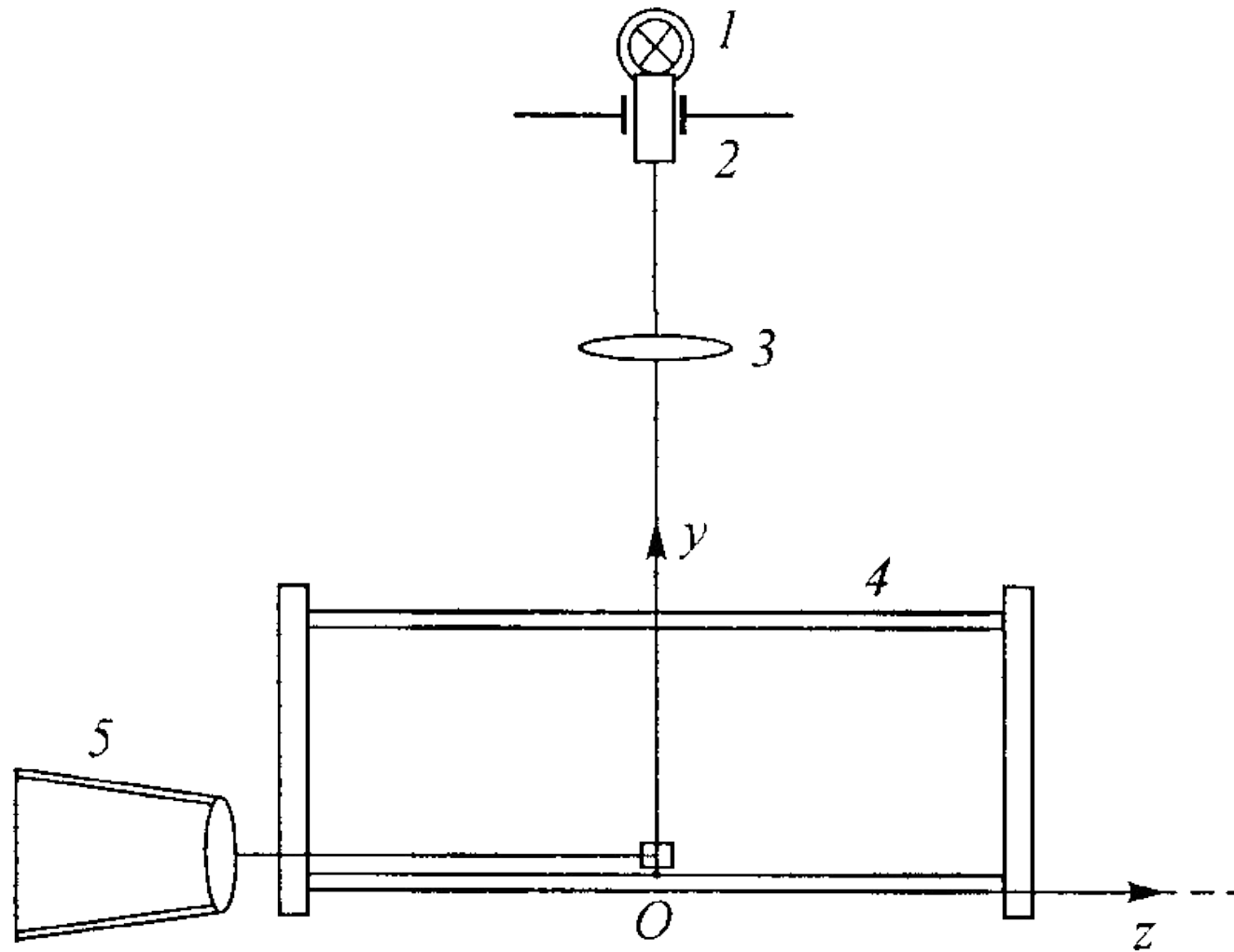


Рис. 6 15. Оптическая схема метода стробоскопической визуализации течений:

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

PIV метод

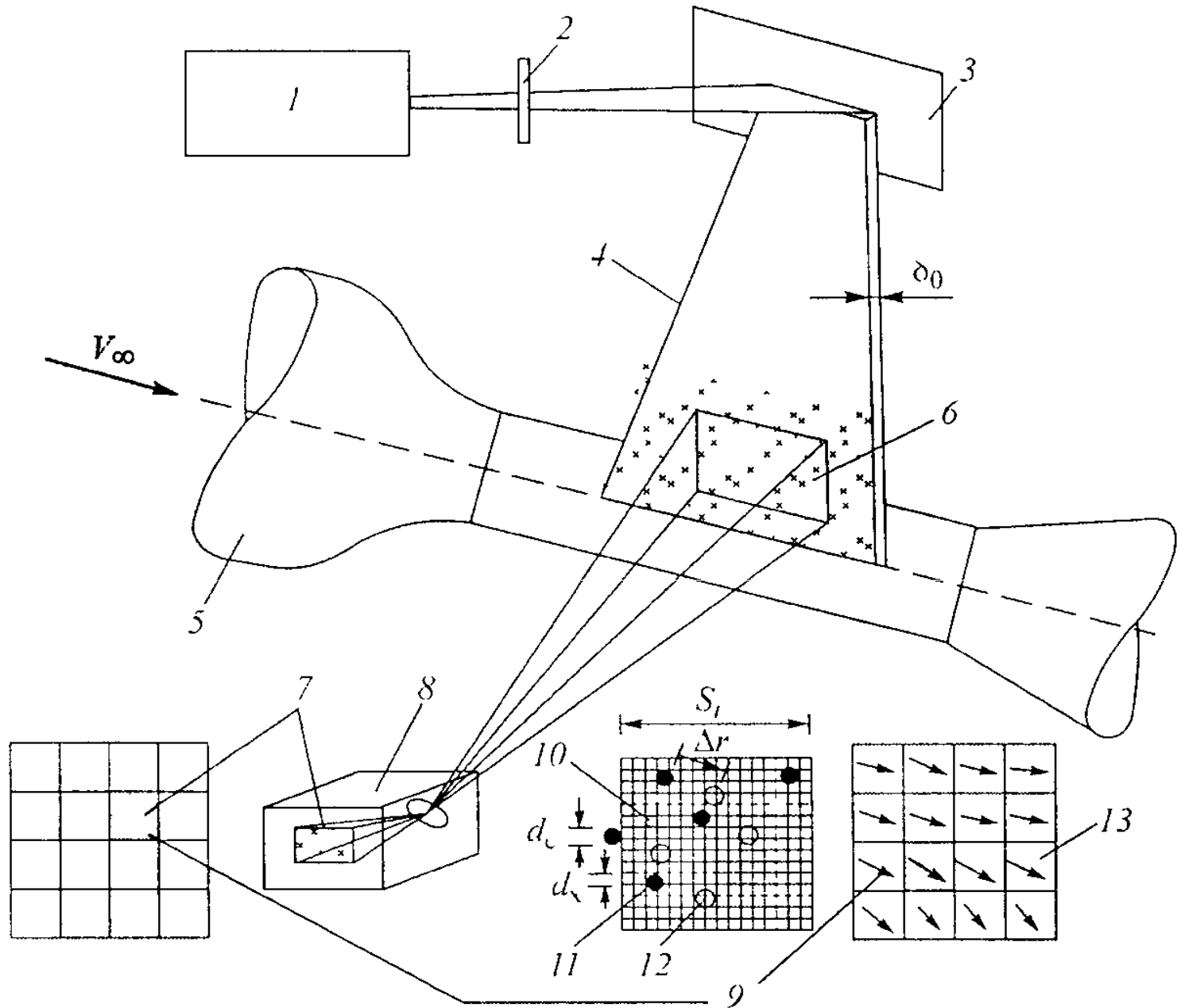
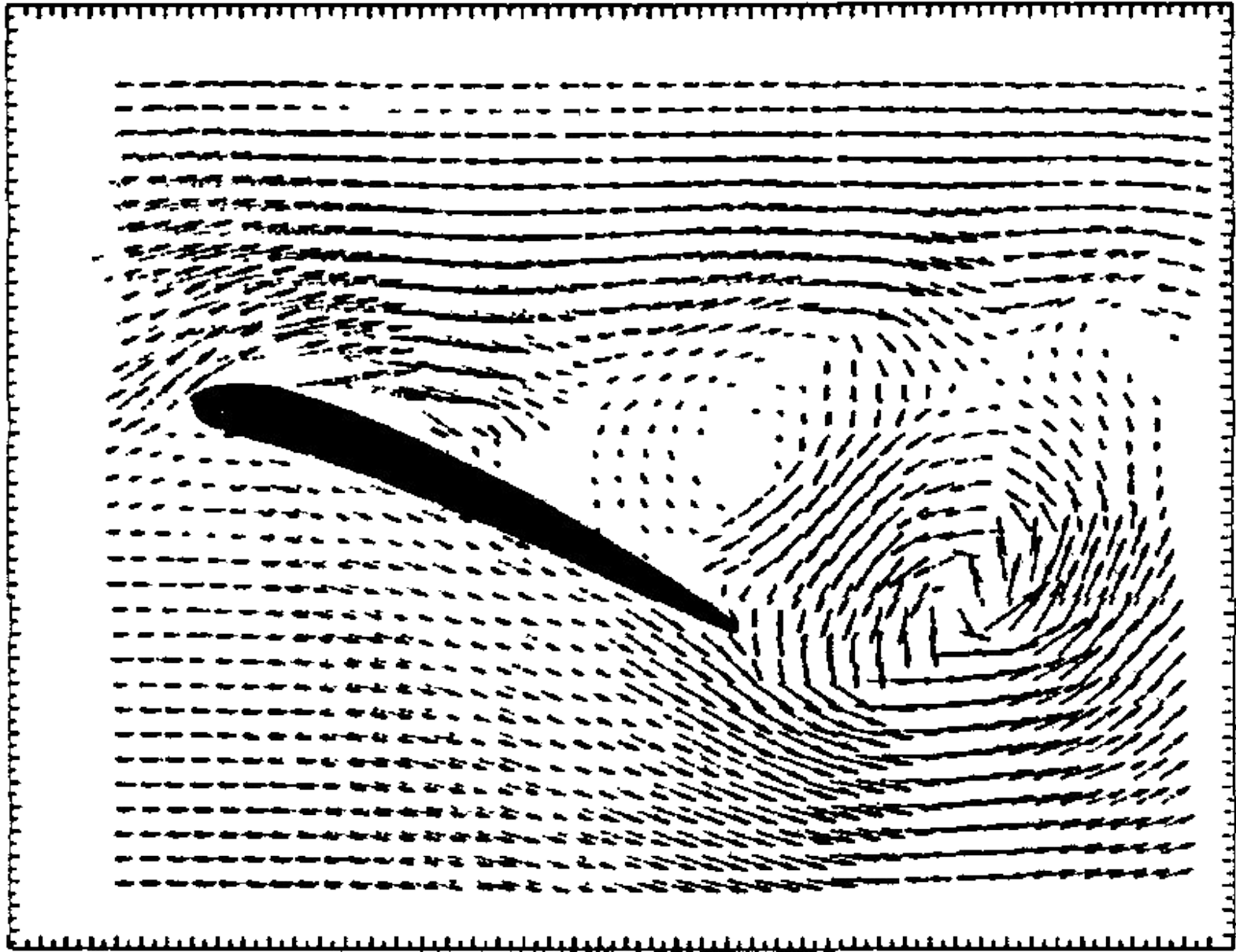
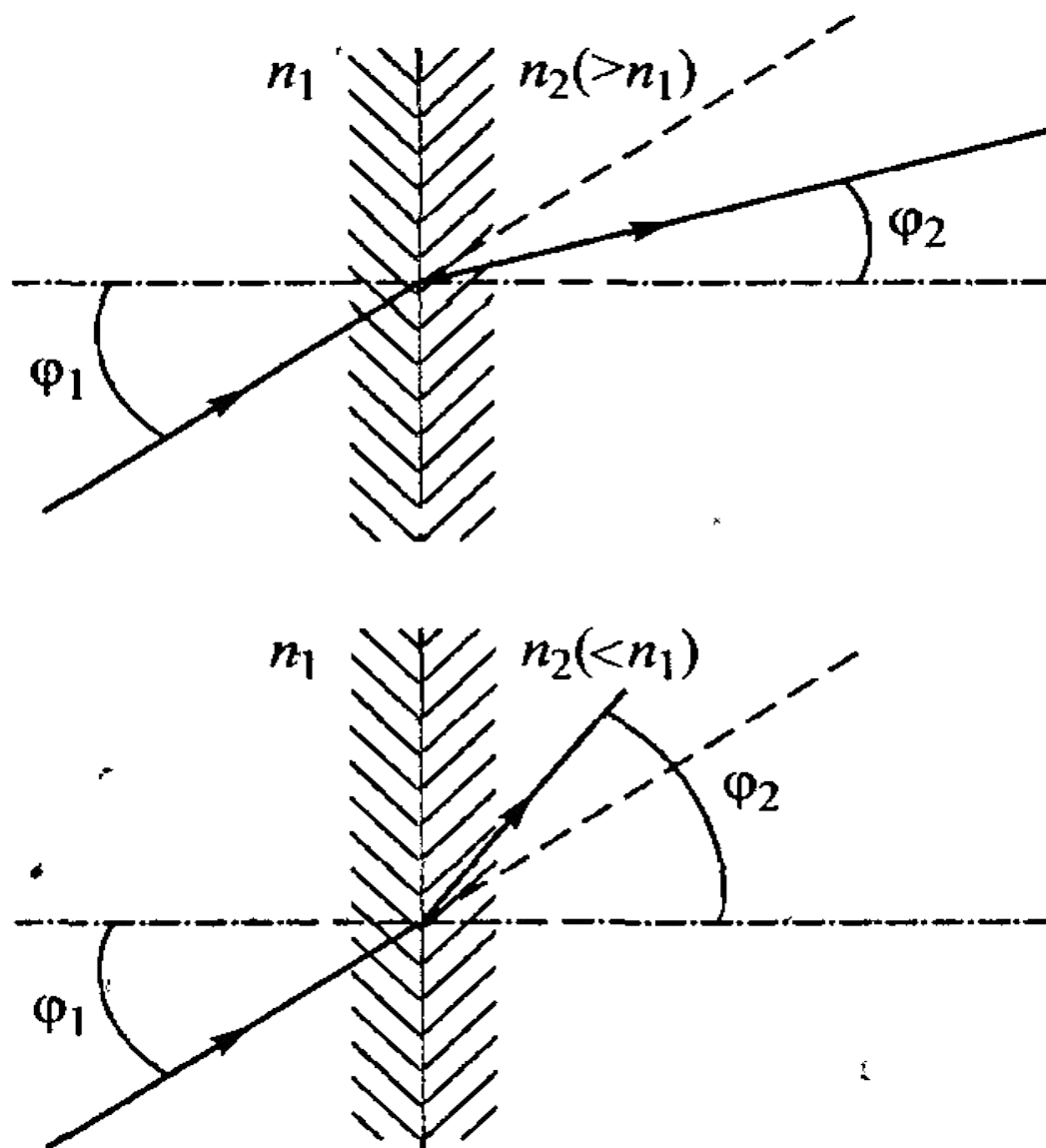


Рис 6 16. Иллюстрация принципа действия метода визуализации полей скорости по изображениям движущихся частиц



*Рис. 6. 17.* Пример распределения мгновенных векторов скорости

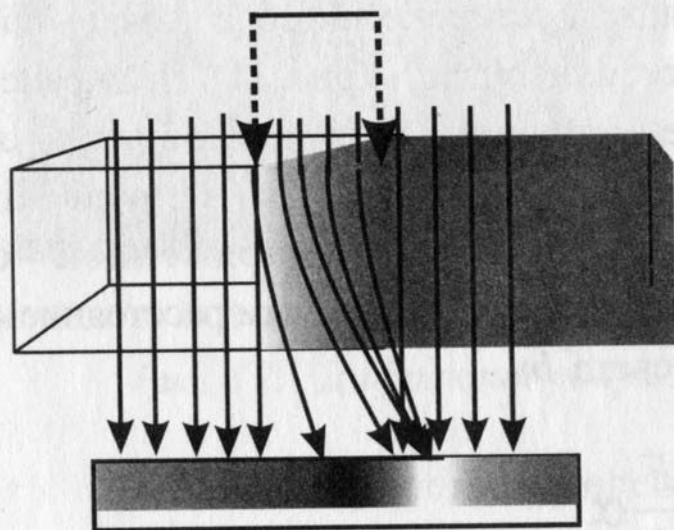
## ТЕНЕВЫЕ МЕТОДЫ



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



Скачок уплотнения



Направление потока

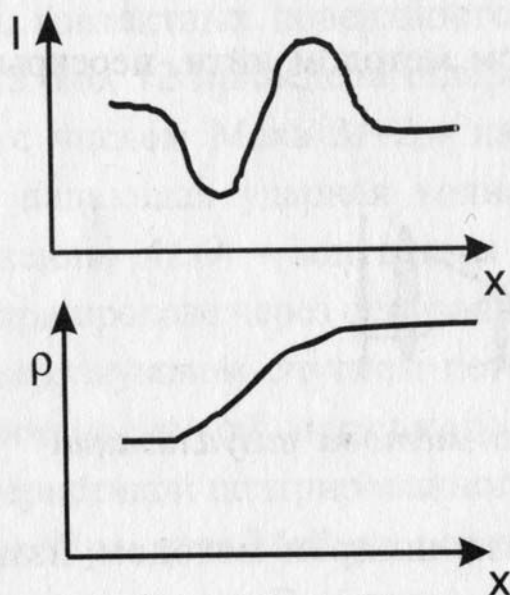
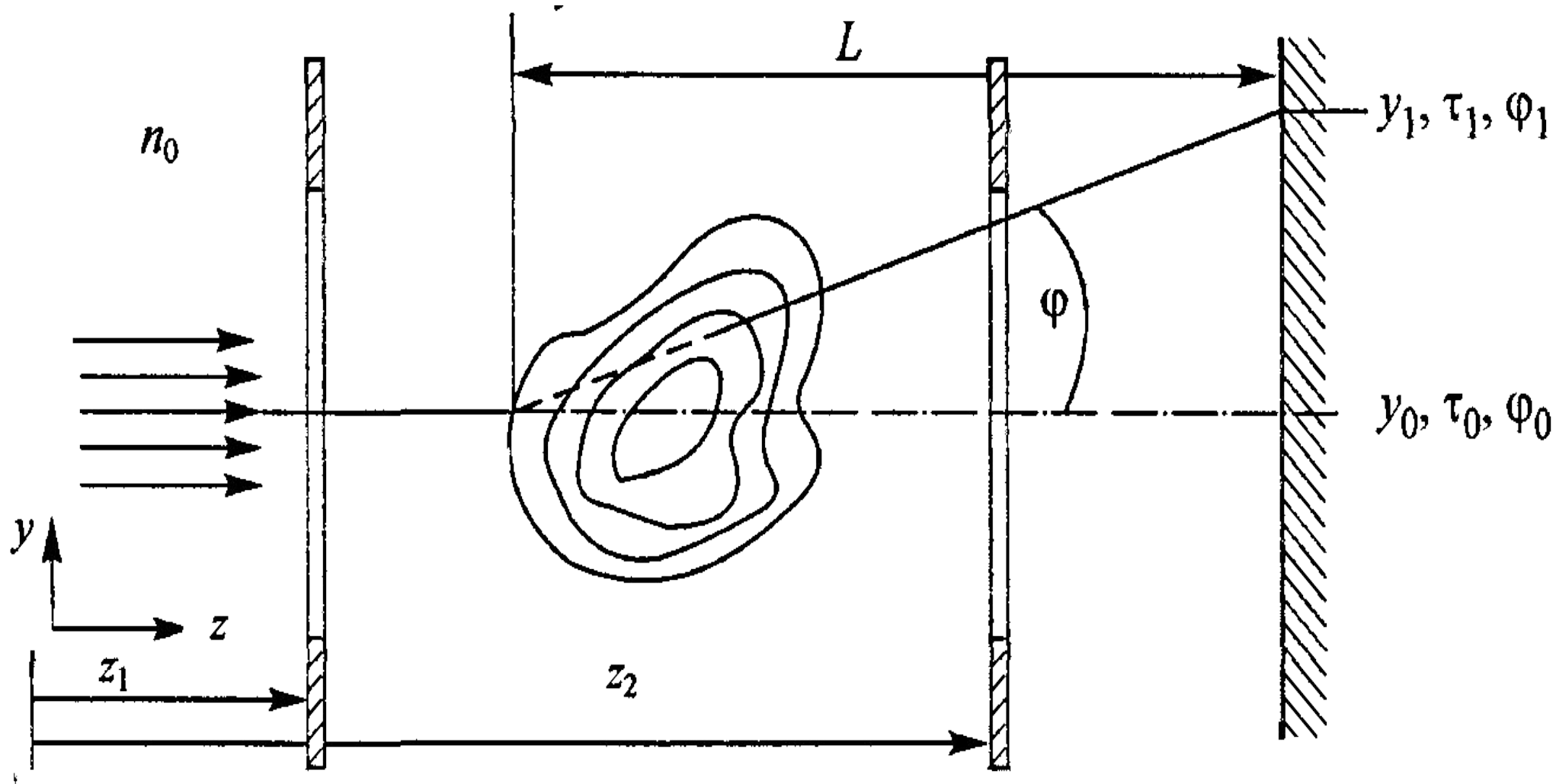
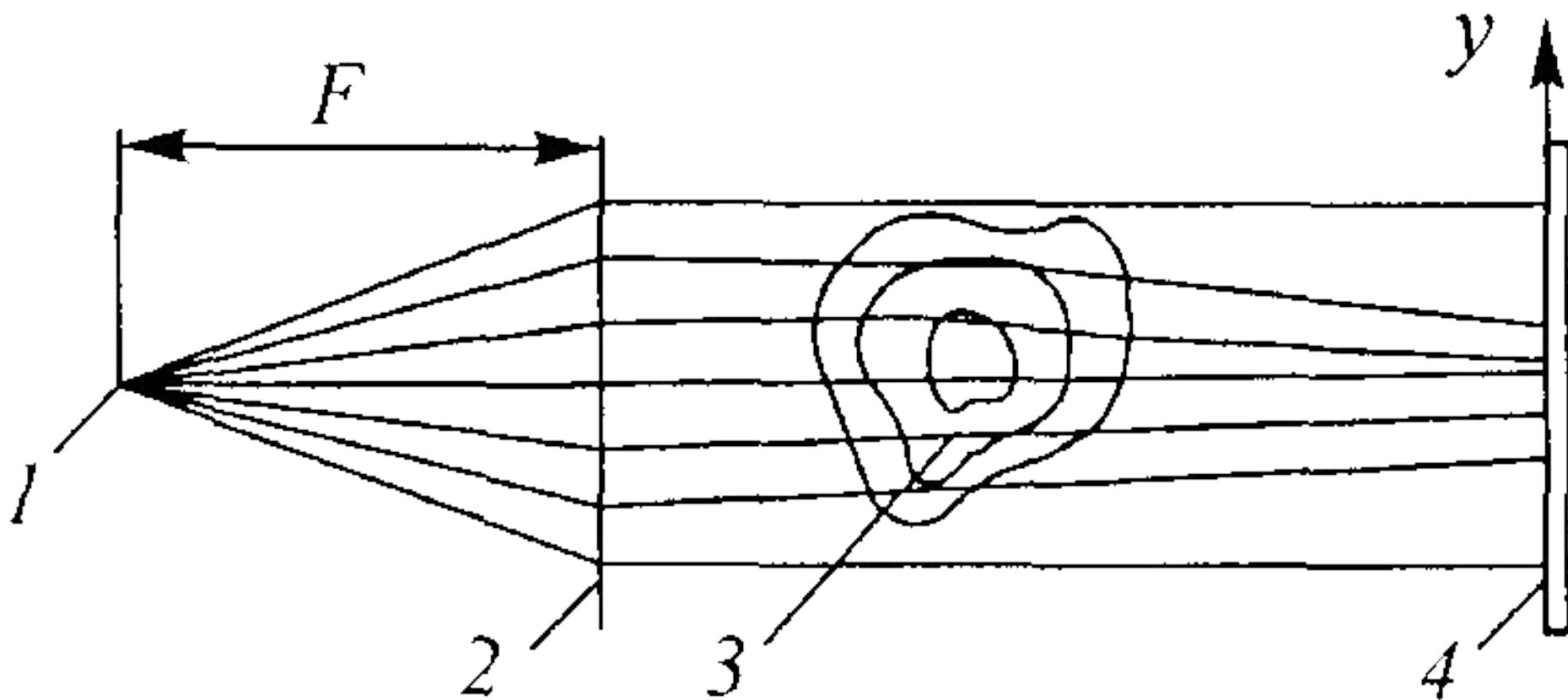


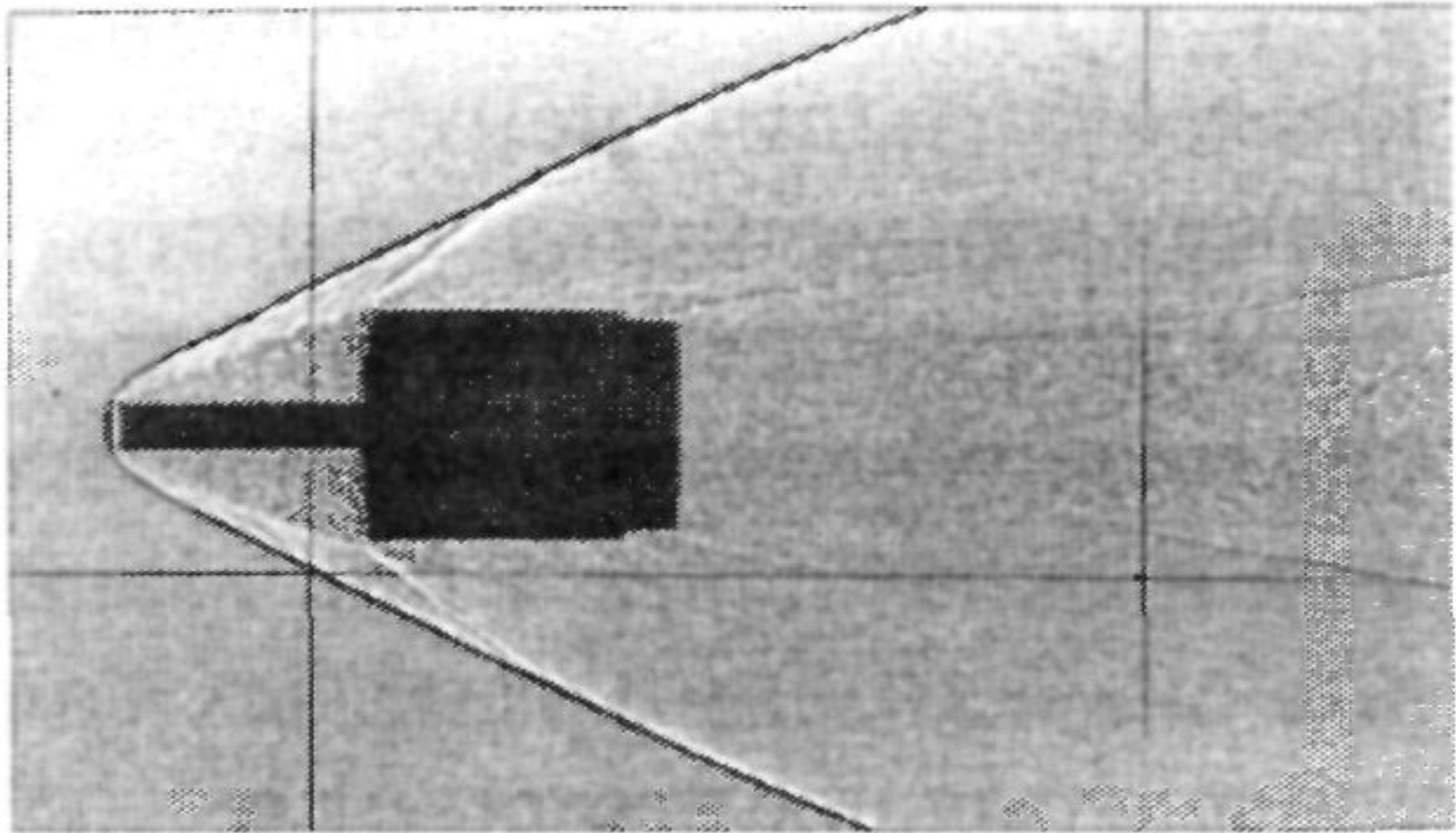
Рис. 10. Схема теневого метода. Теневое изображение скачка уплотнения



*Рис. 6.19.* Прохождение светового потока через исследуемую неоднородность



*Рис 6 20* Принципиальная схема  
прямотеневого метода



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

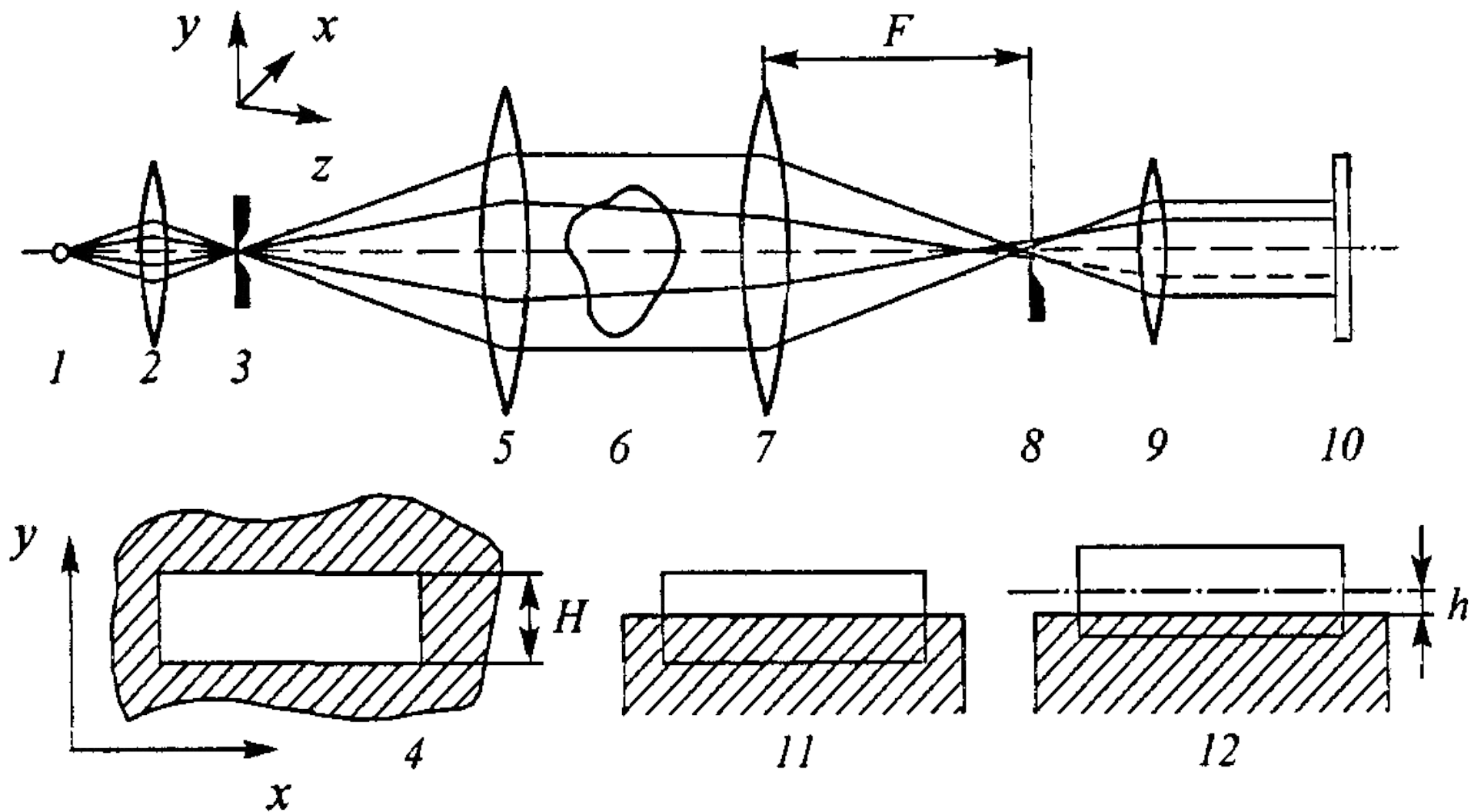
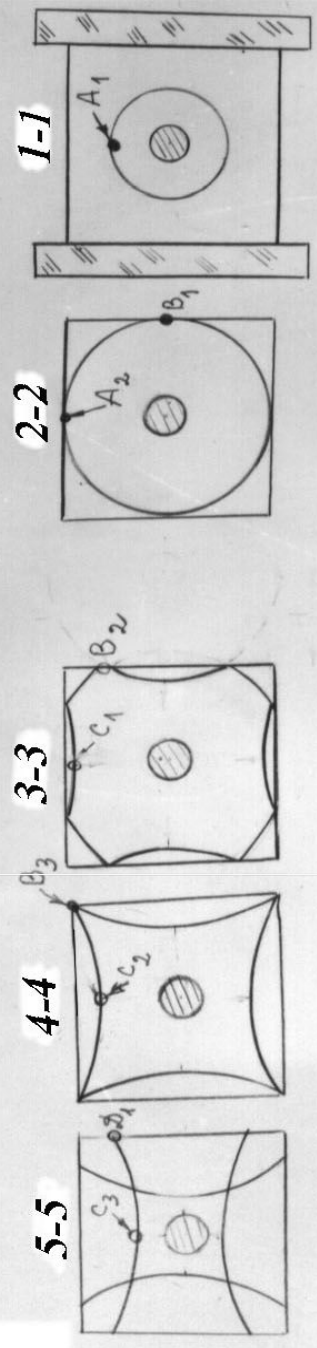
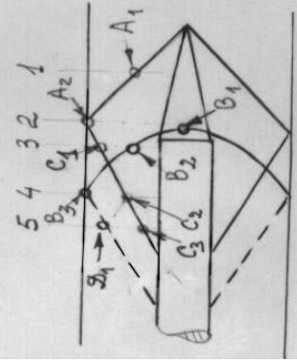
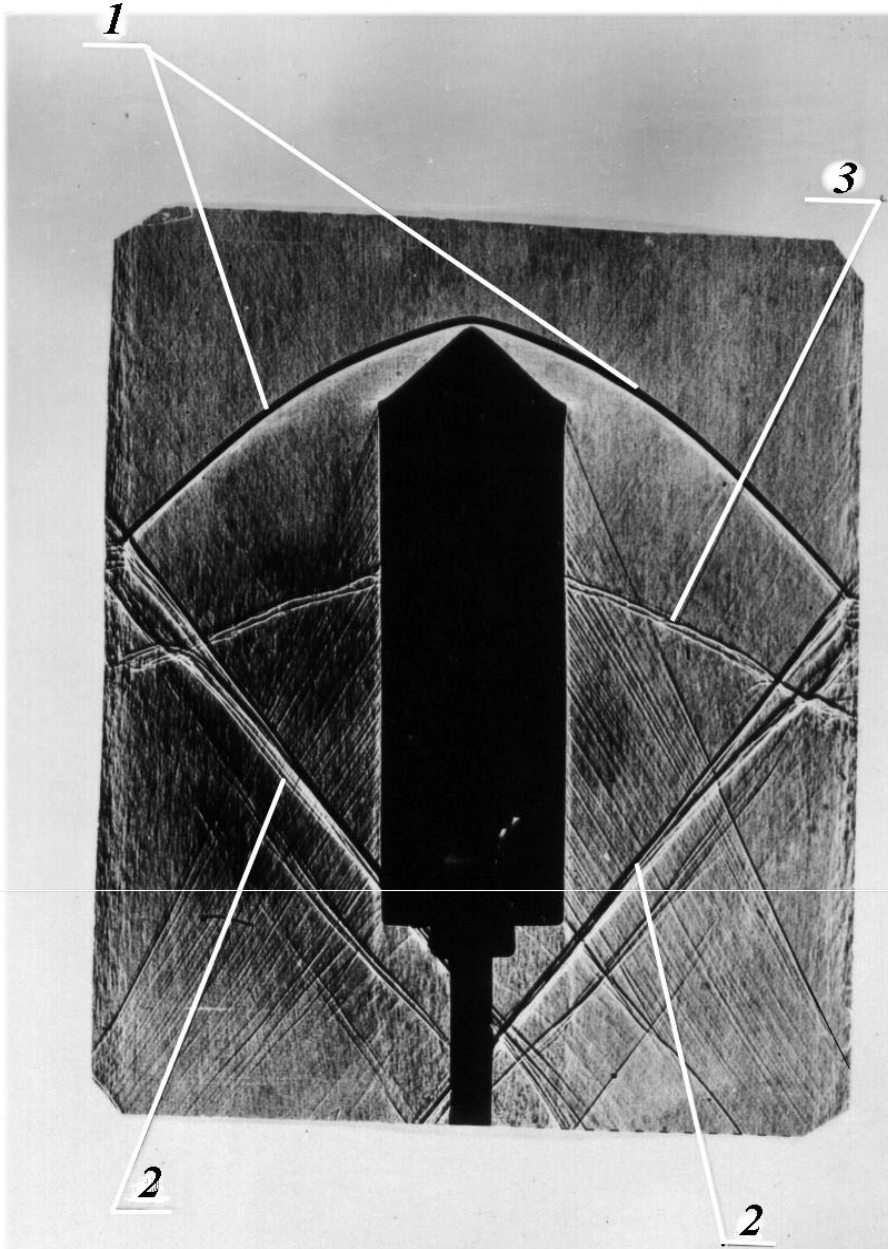
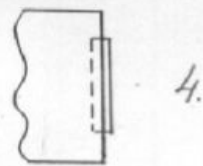
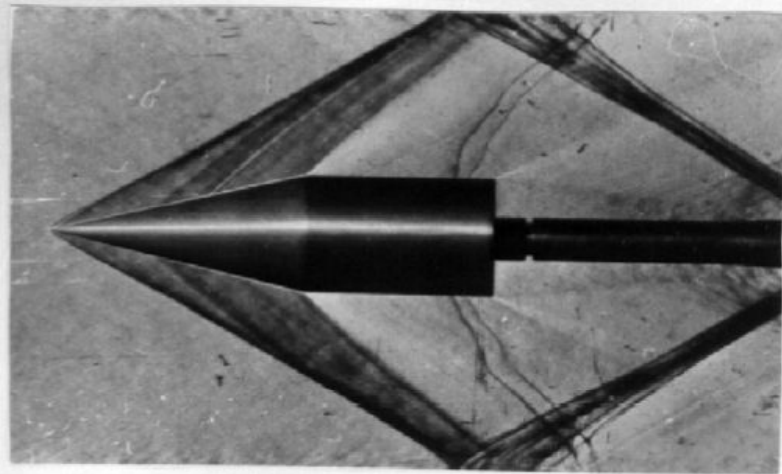
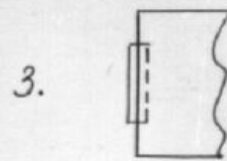
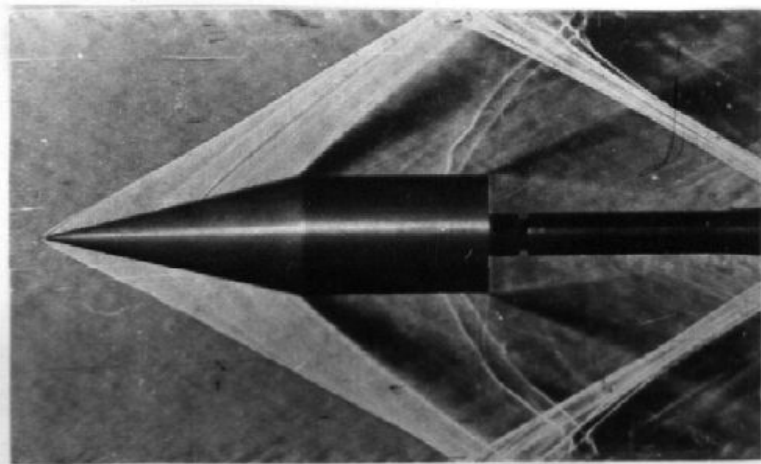
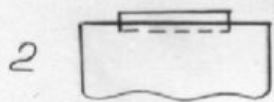
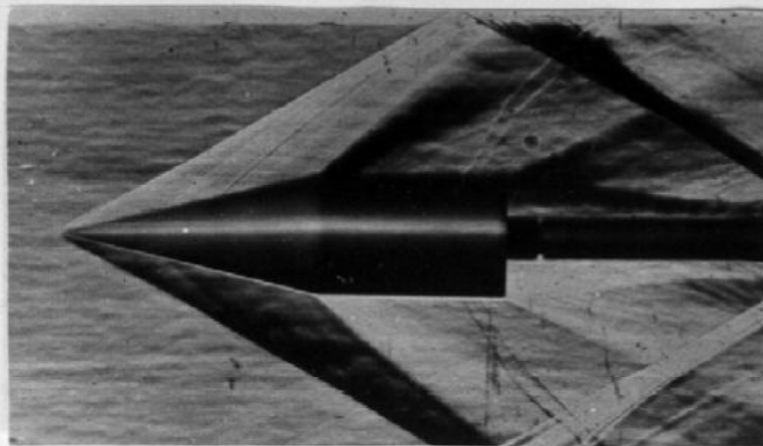
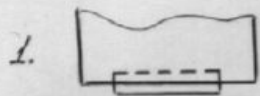
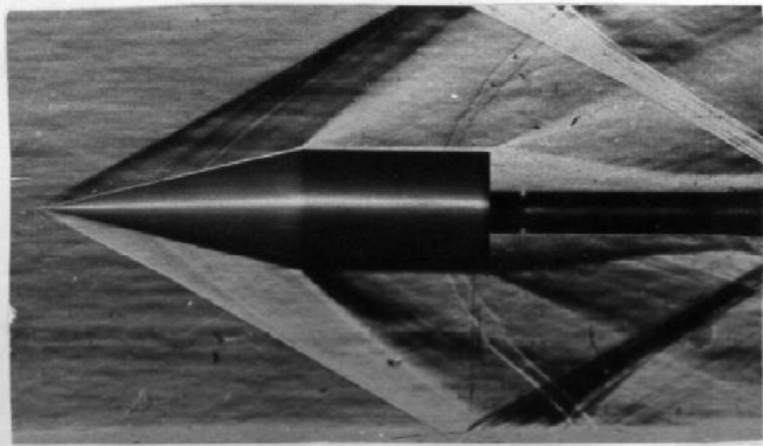
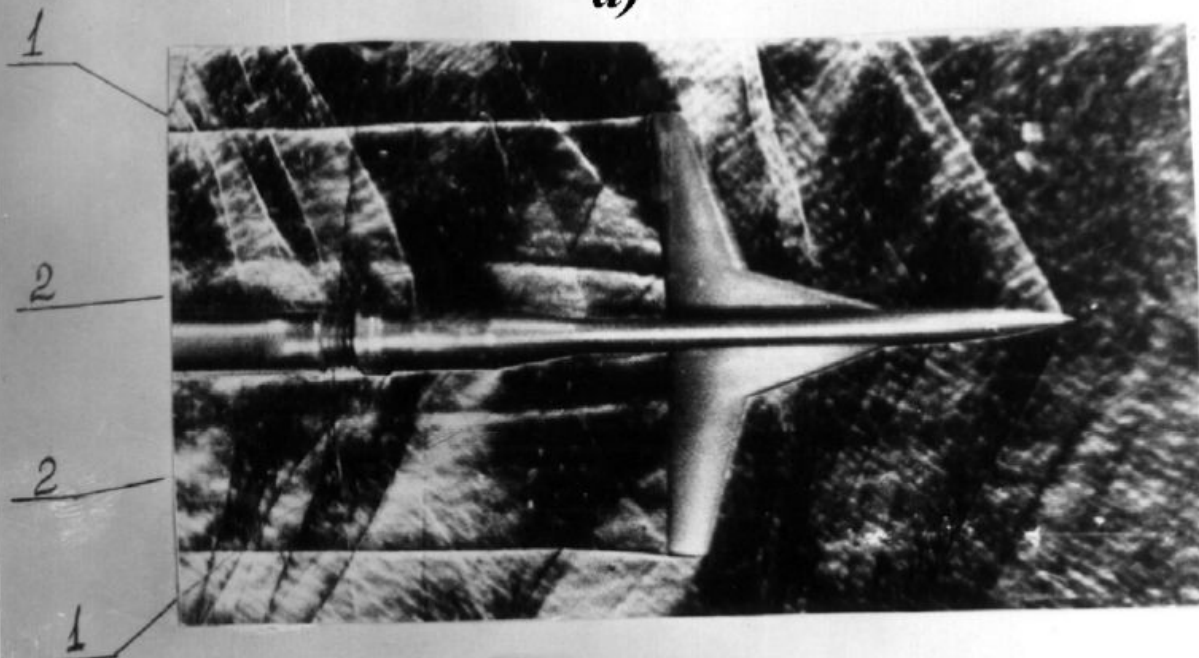


Рис. 6.23. Оптическая схема теневого метода

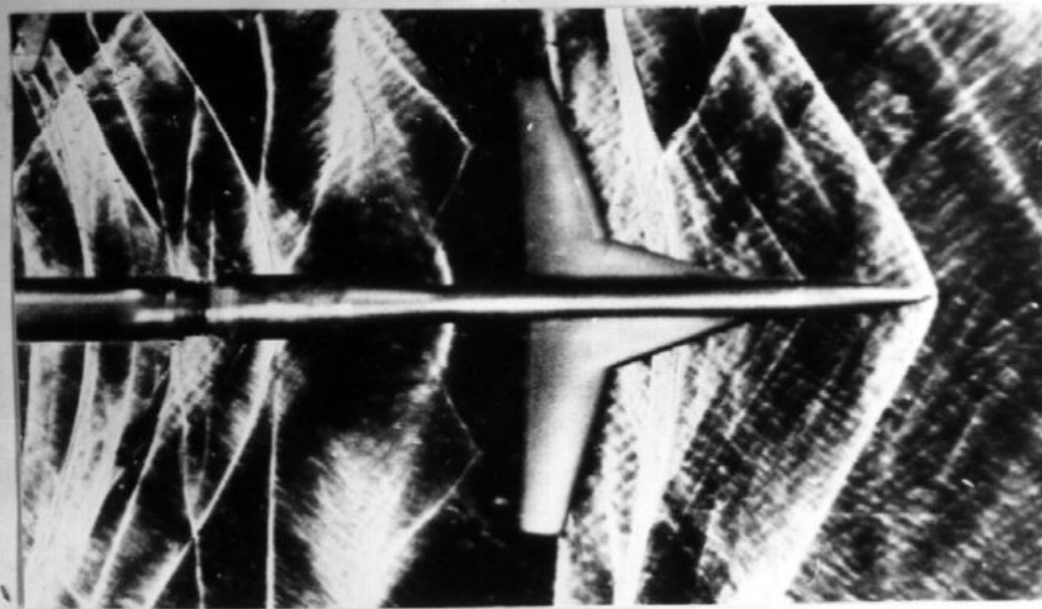




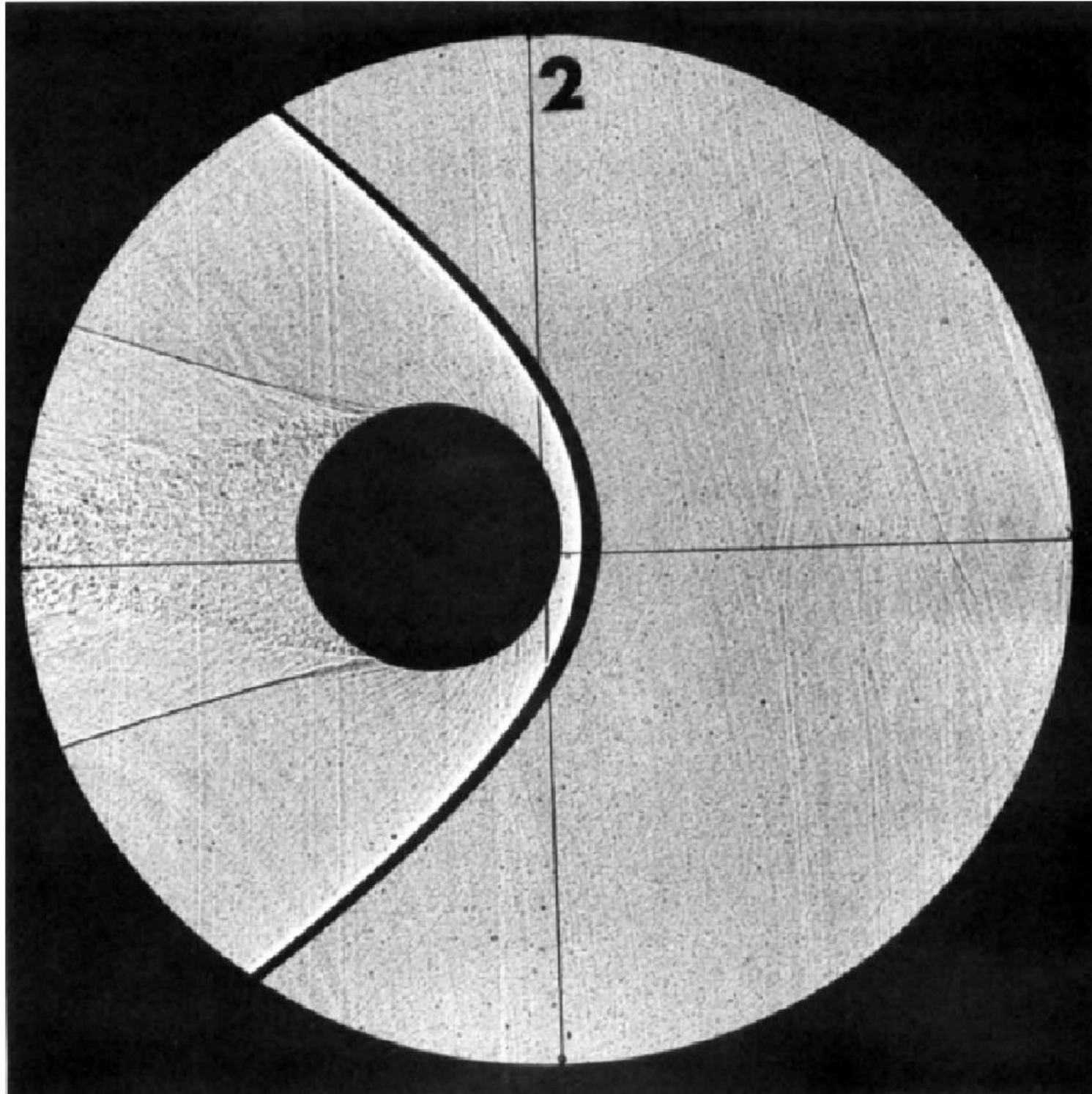
*a)*



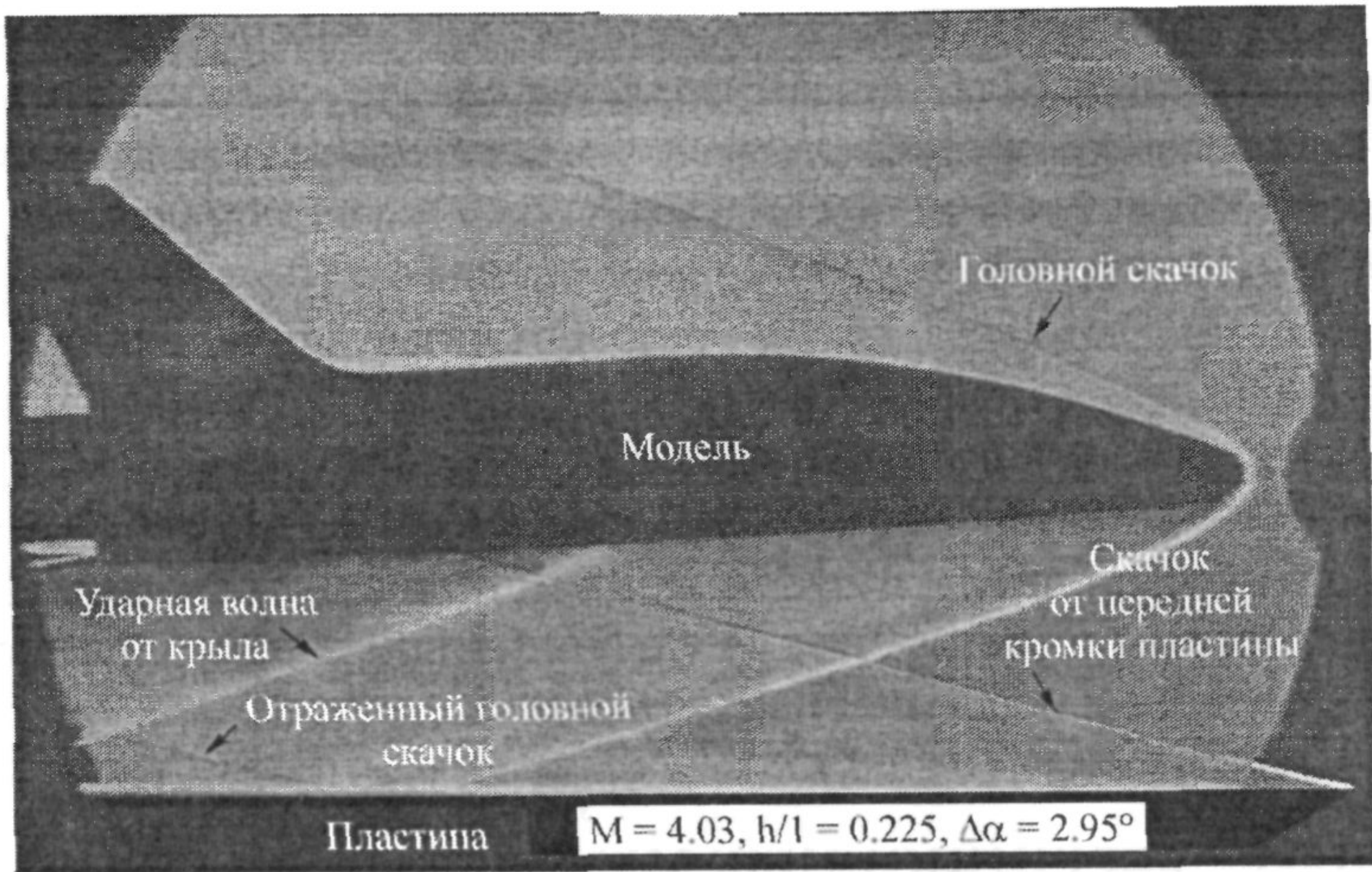
*b)*



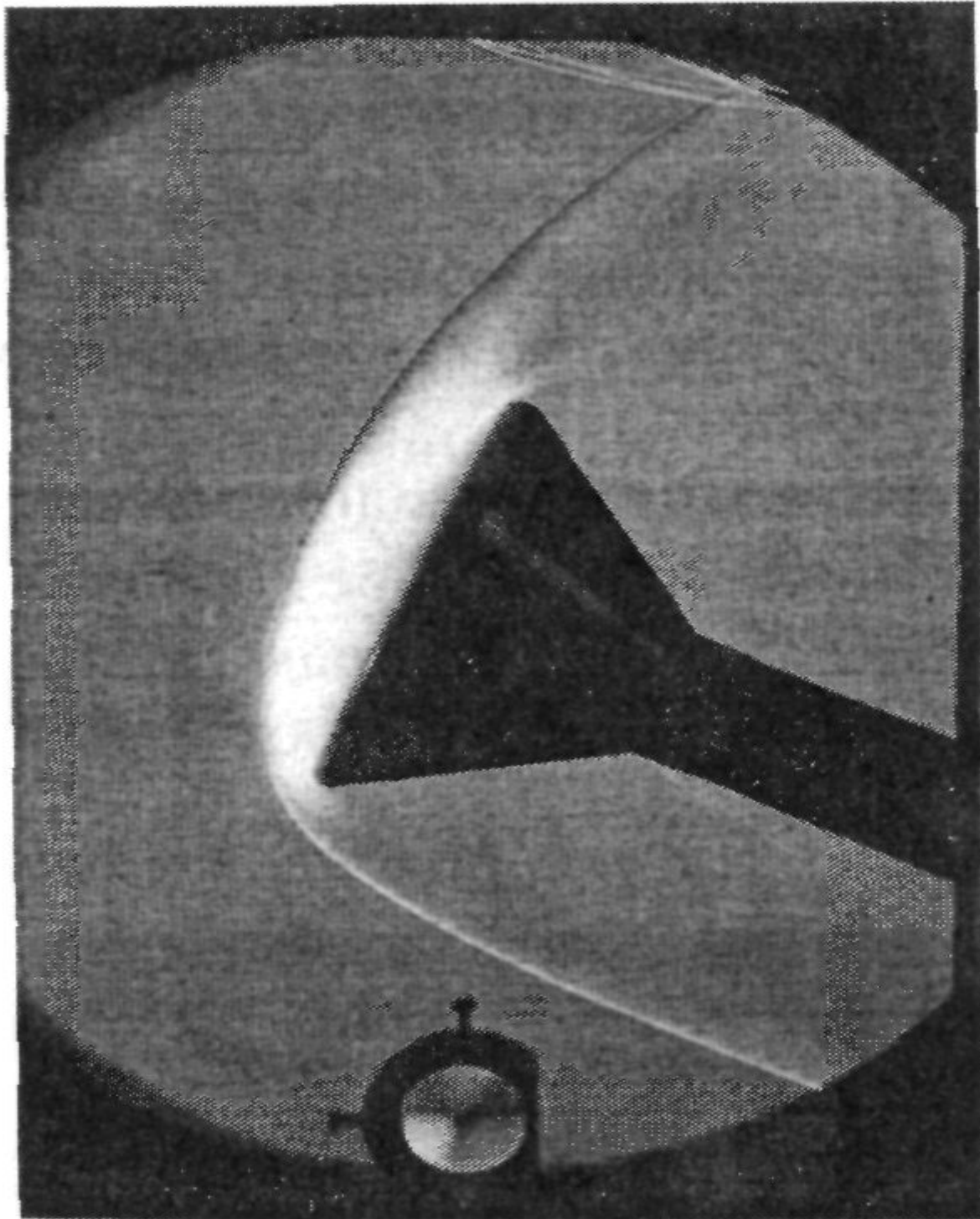




**Fig. 3.6** Shadowgraph of a sphere flying at a Mach number  $M = 1.7$ . (From Stilp, 1968.)

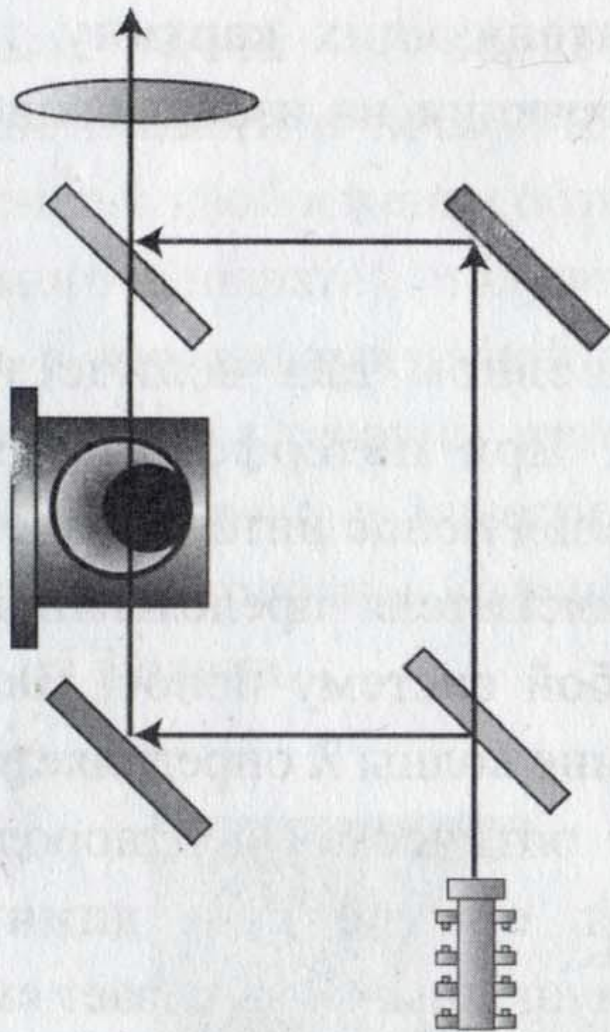


*a*



# Интерференционные методы

Экран



Экран Интенсивность

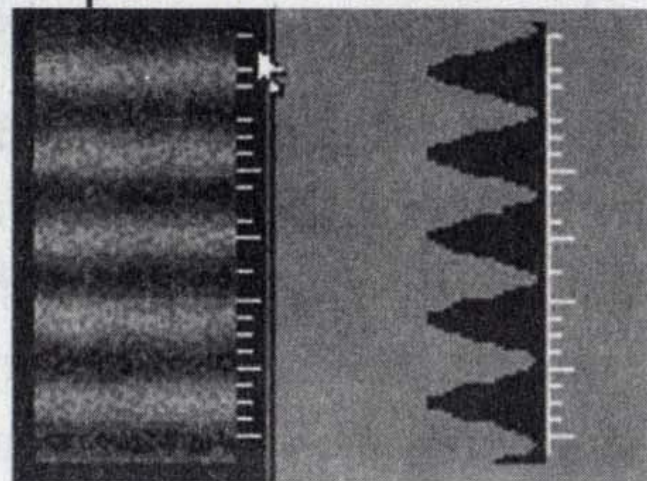
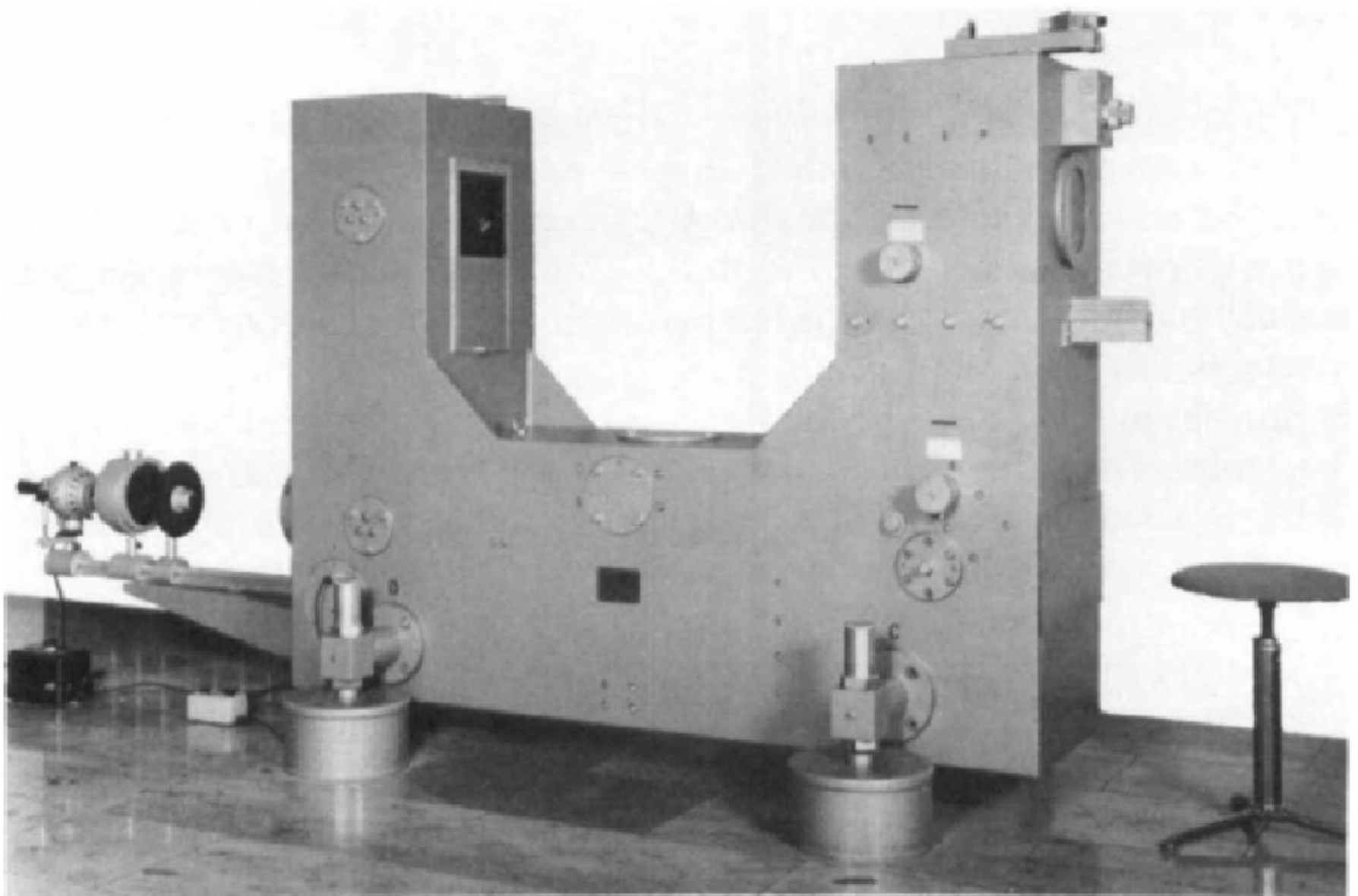
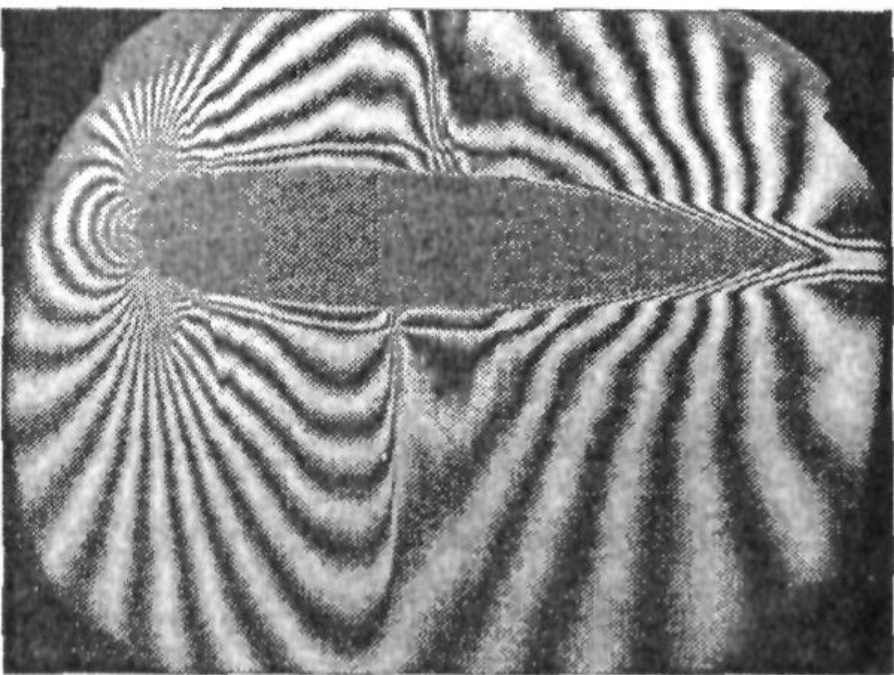


Рис. 15. Схема интерферометра Маха-Цендера

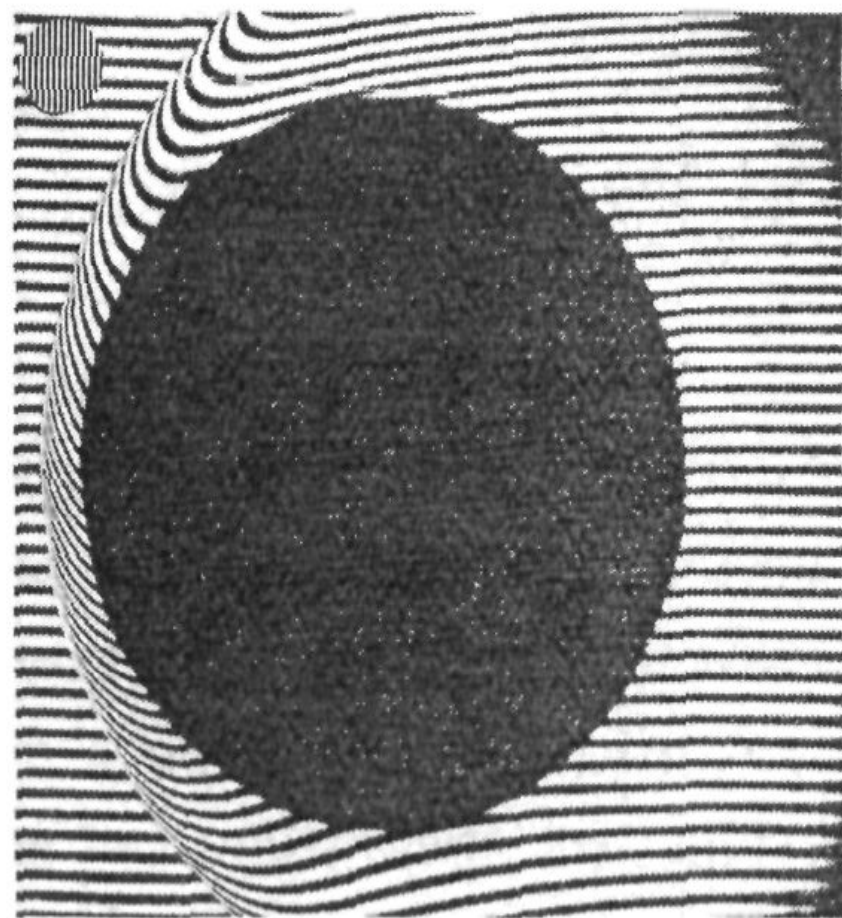


**Fig. 3.34** Mach-Zehnder interferometer manufactured by Zeiss, Oberkochen, Germany.

---



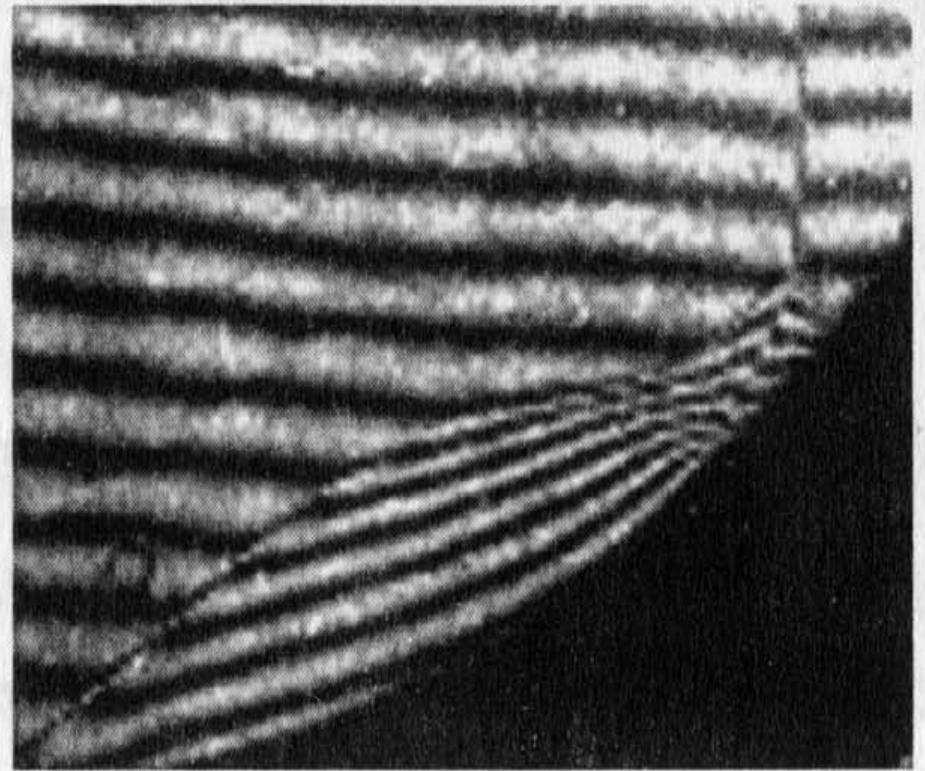
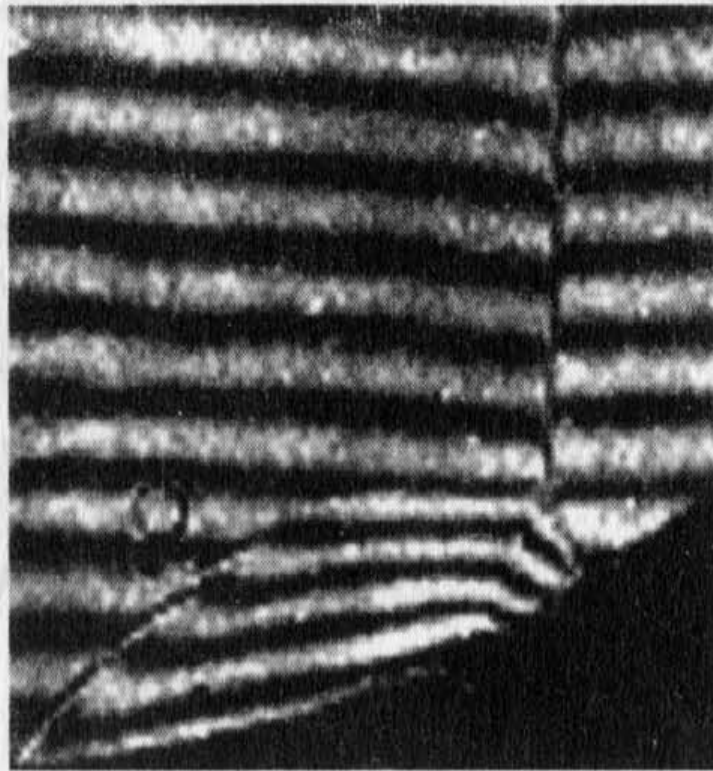
*a*



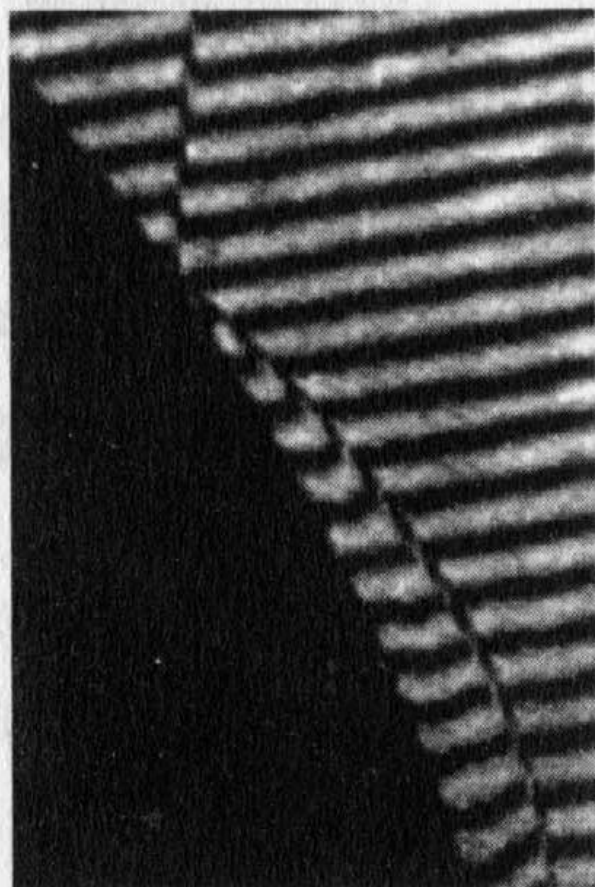
*б*

*Рис. 6.26.* Примеры интерферограмм:

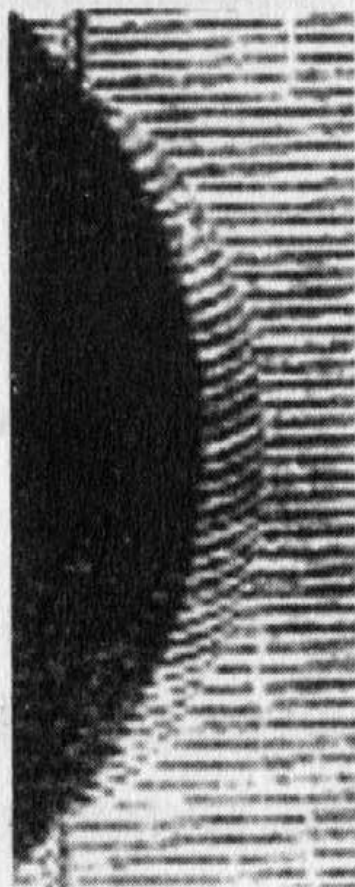
*а* – обтекание симметричного профиля при  $M = 0,8$ ; *б* – обтекание шара при  $M = 5,7$  [166]



*Рис. 17. Отражение ударной волны от вогнутой цилиндрической поверхности*



*a*



*б*

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



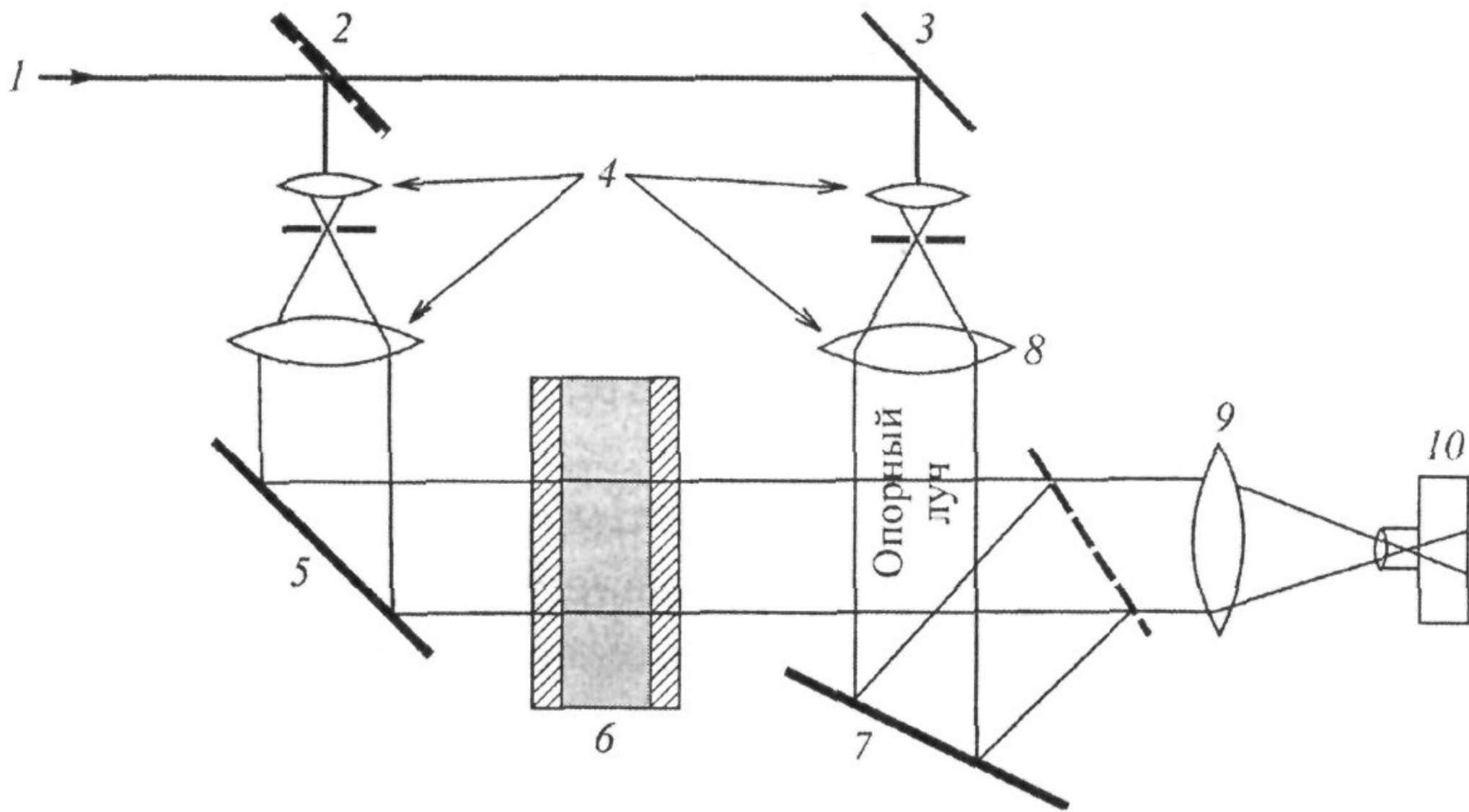
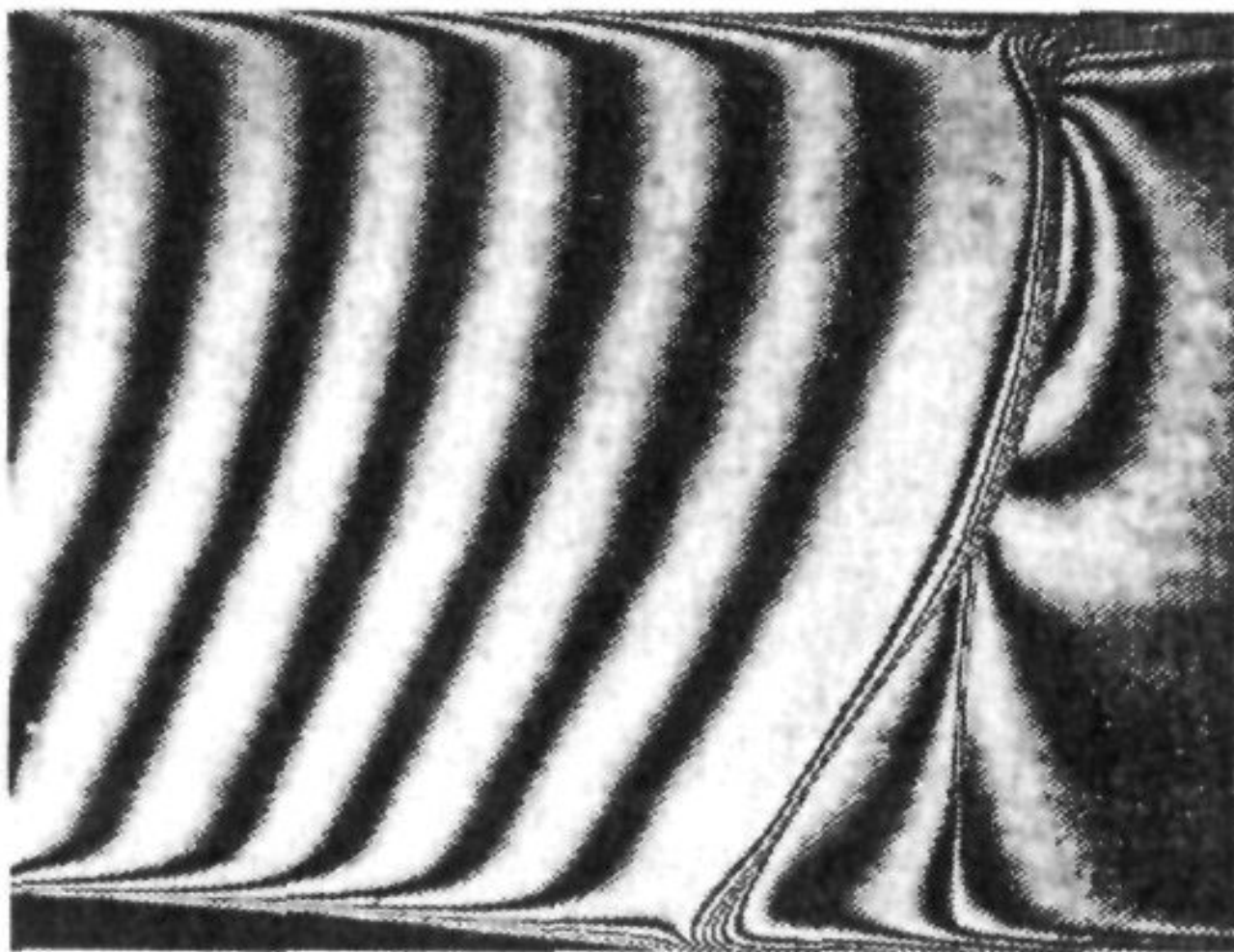


Рис. 6.27. Принципиальная схема голографического интерферометра [165]



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

# Метод лазерного ножа

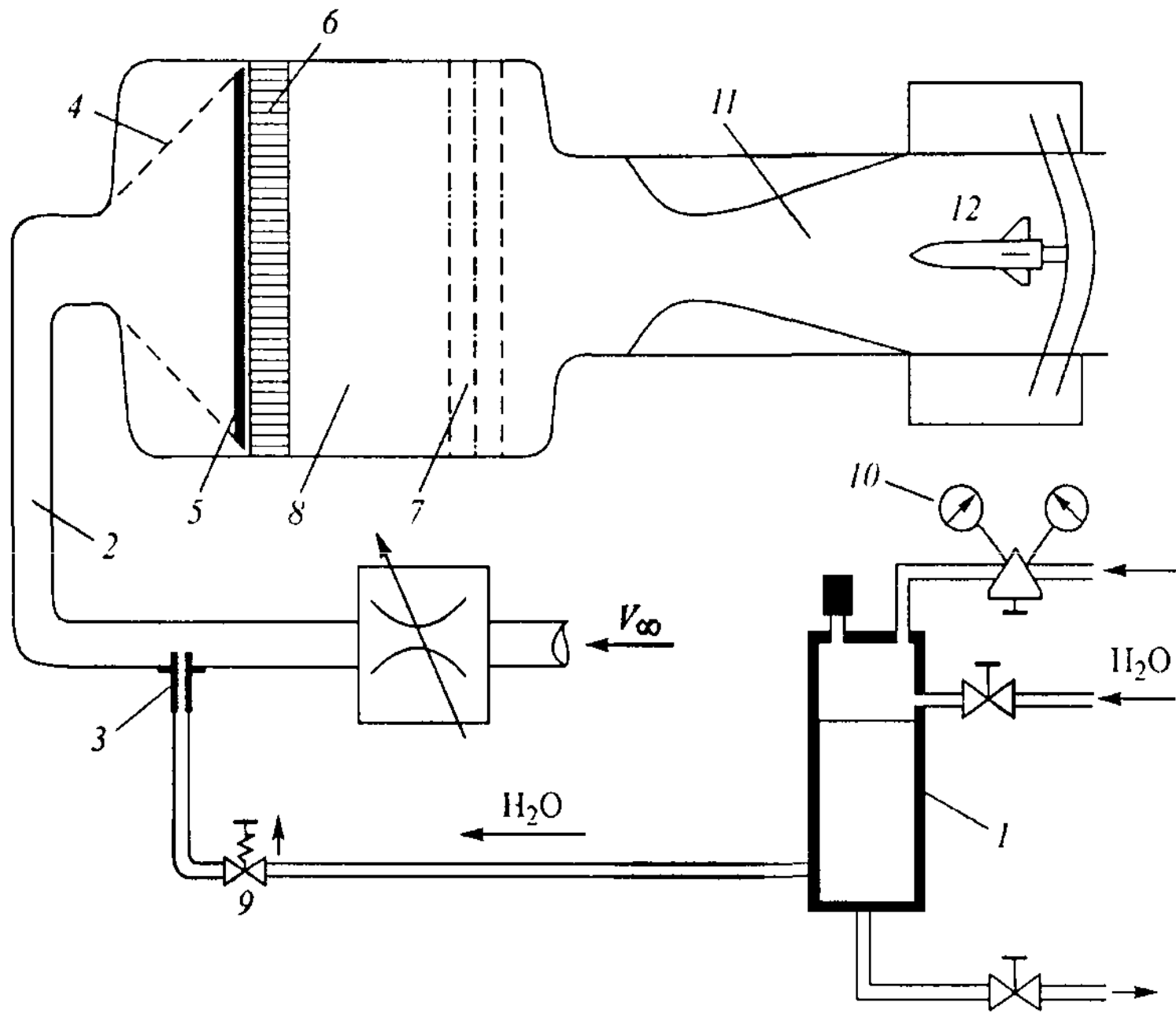
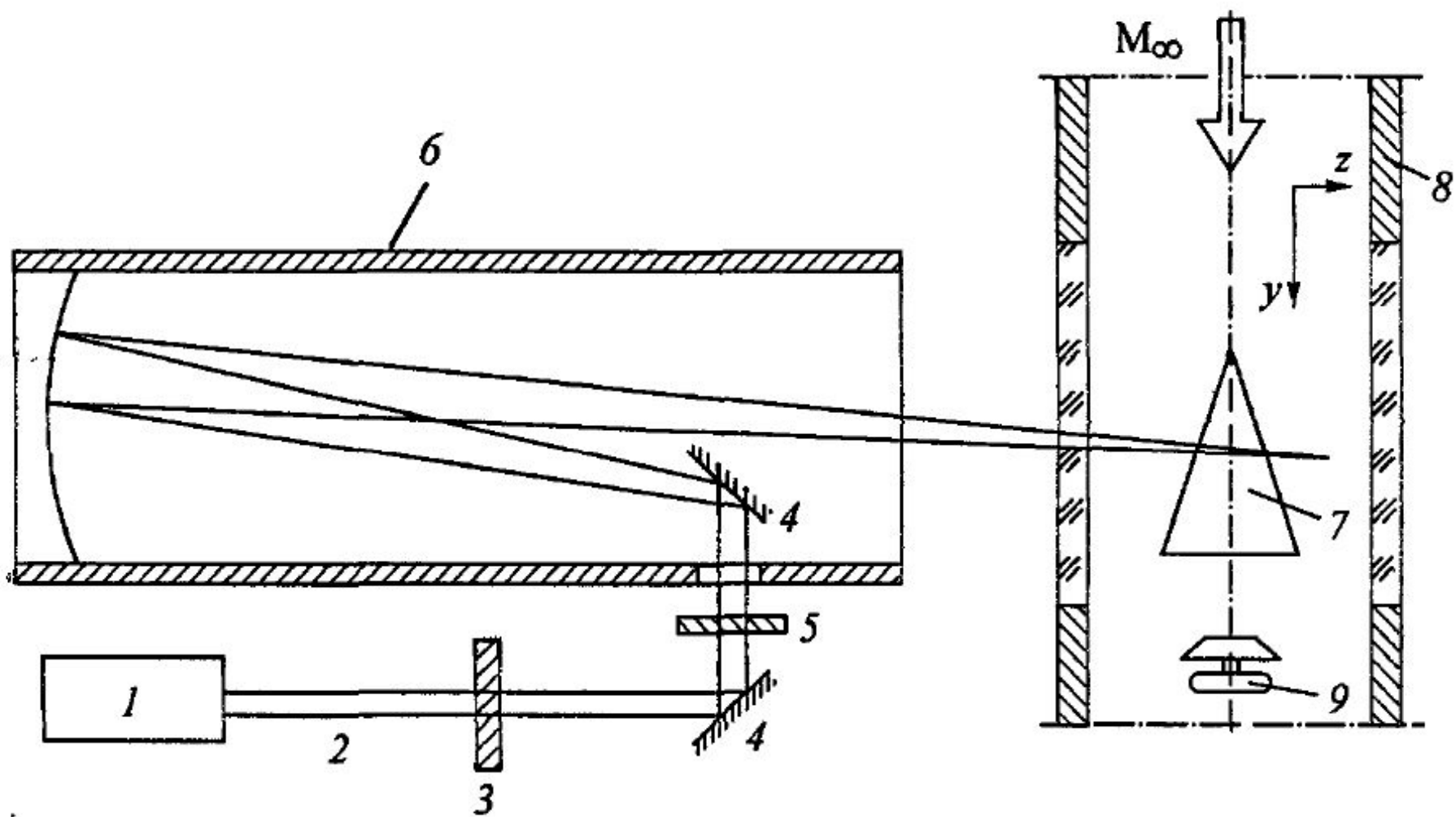
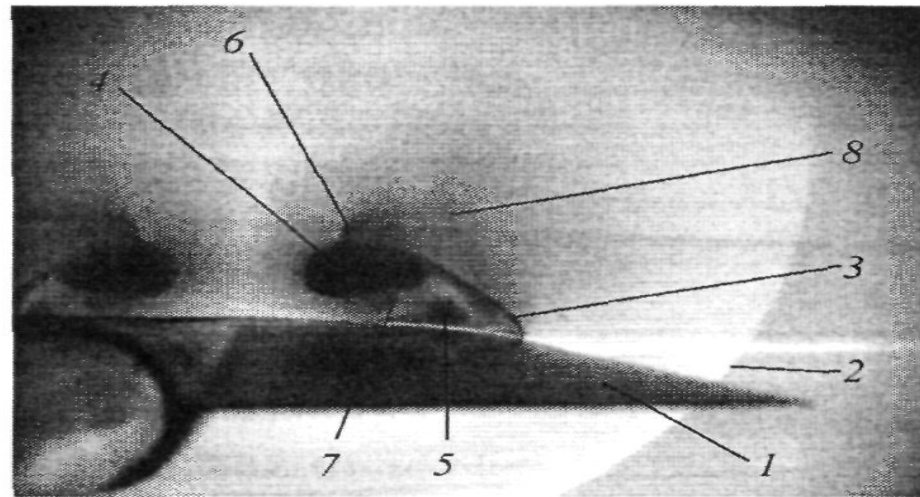


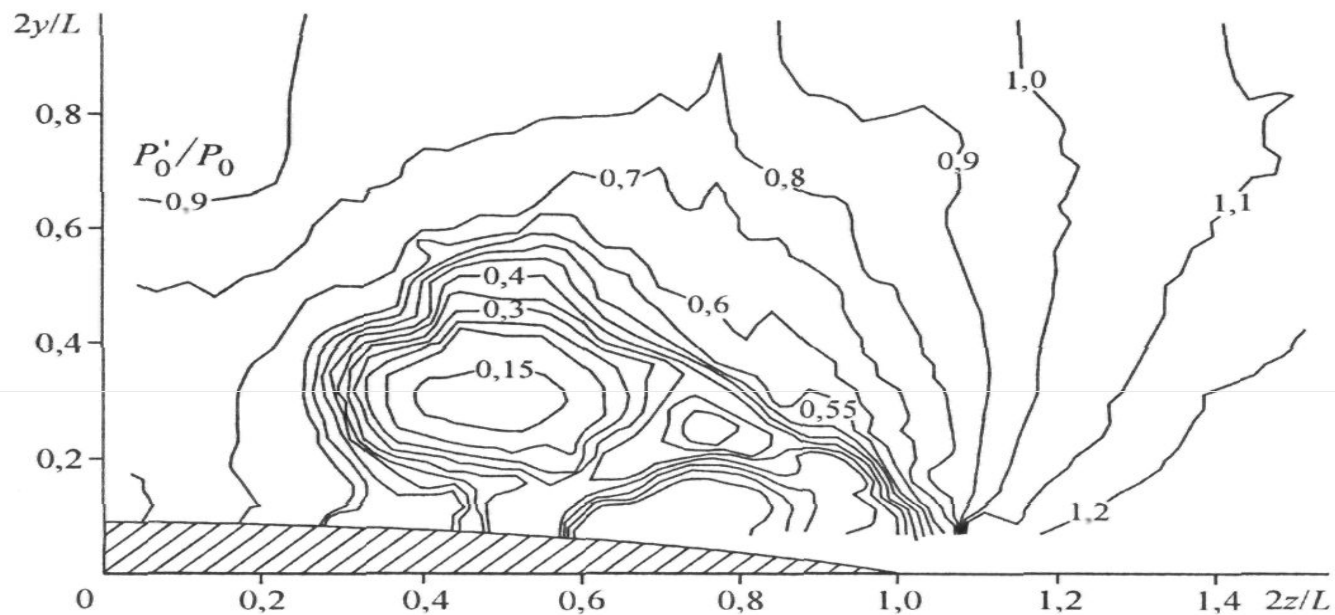
Рис. 6.29. Схема ввода светорассеивающих частиц в тракт трубы Т-313



Оптическая схема формирования «лазерного ножа» [196]



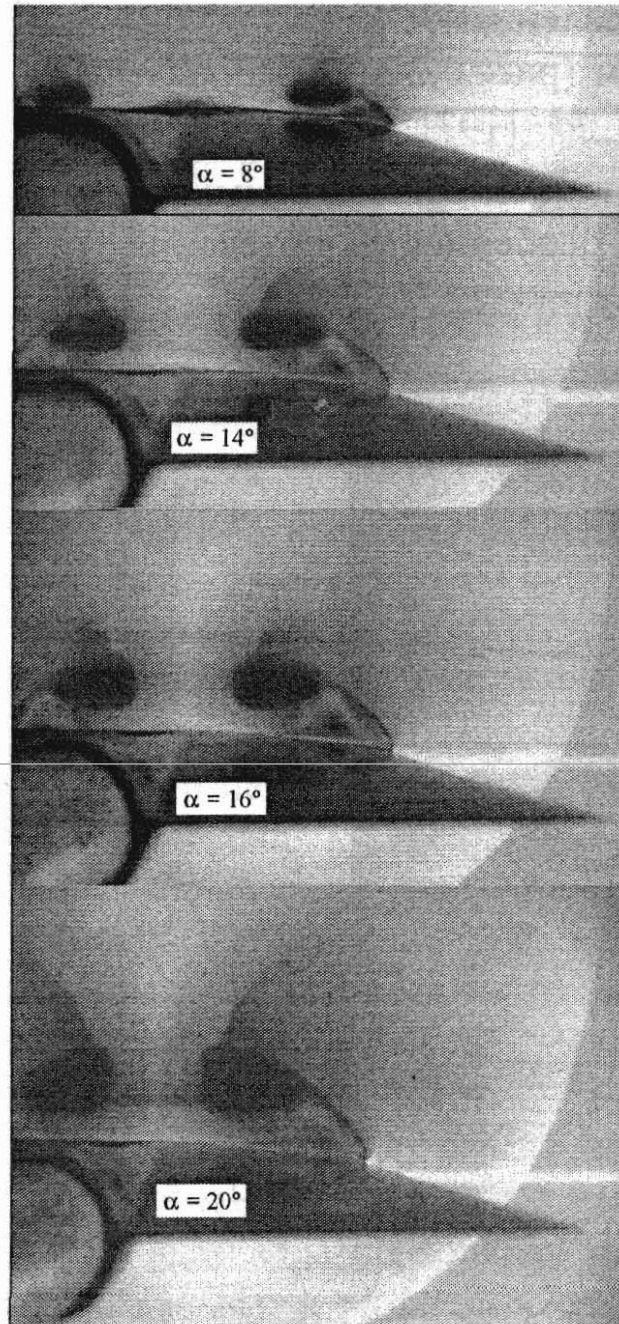
*a*



*б*

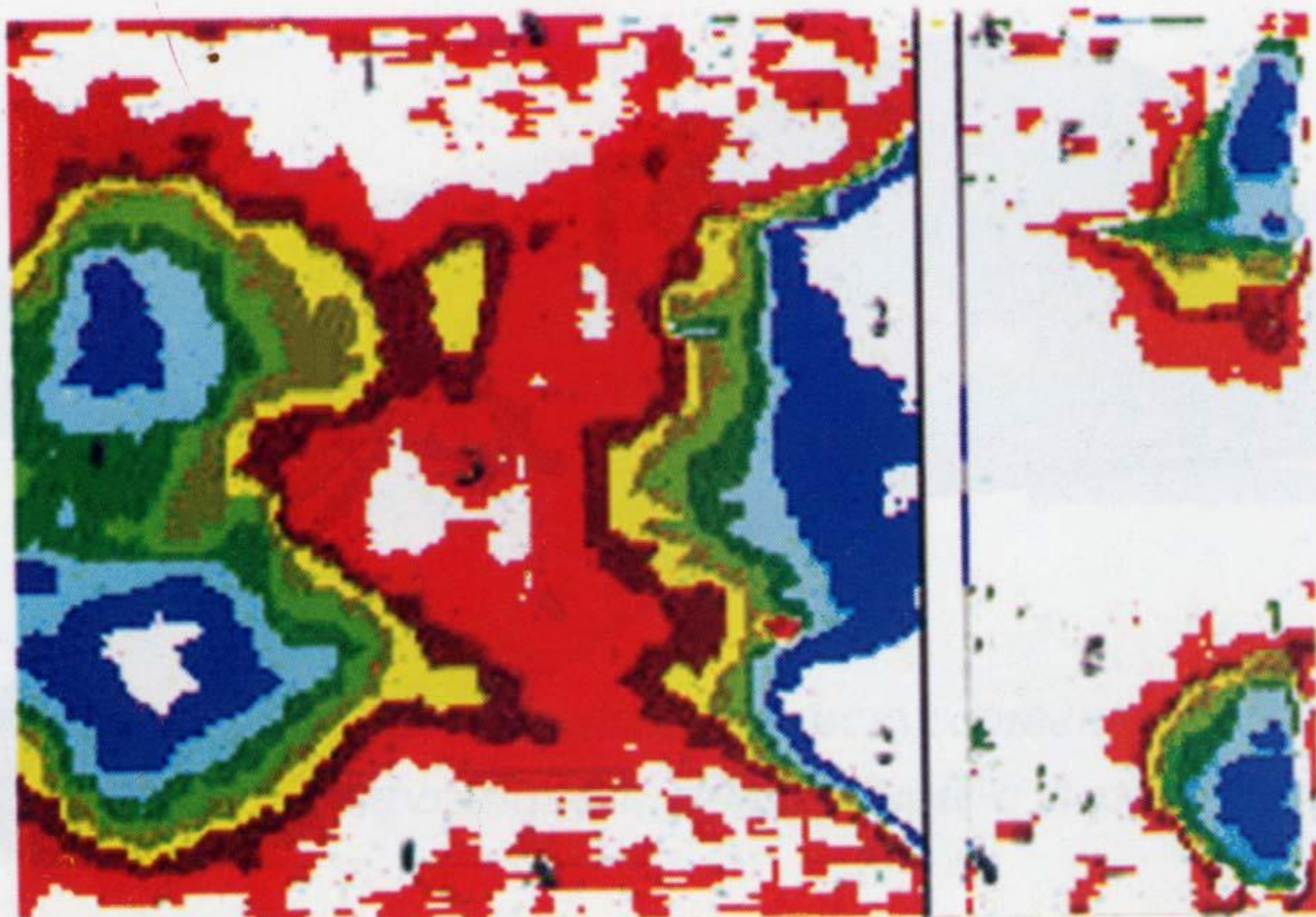
*Рис. 6.31.* Вихревая пелена на подветренной стороне крыла треугольного крыла:

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



*Рис. 6.32. Картины визуализации обтекания треугольного крыла при  $\chi = 78^\circ$ ,  $M_\infty = 2,75$*

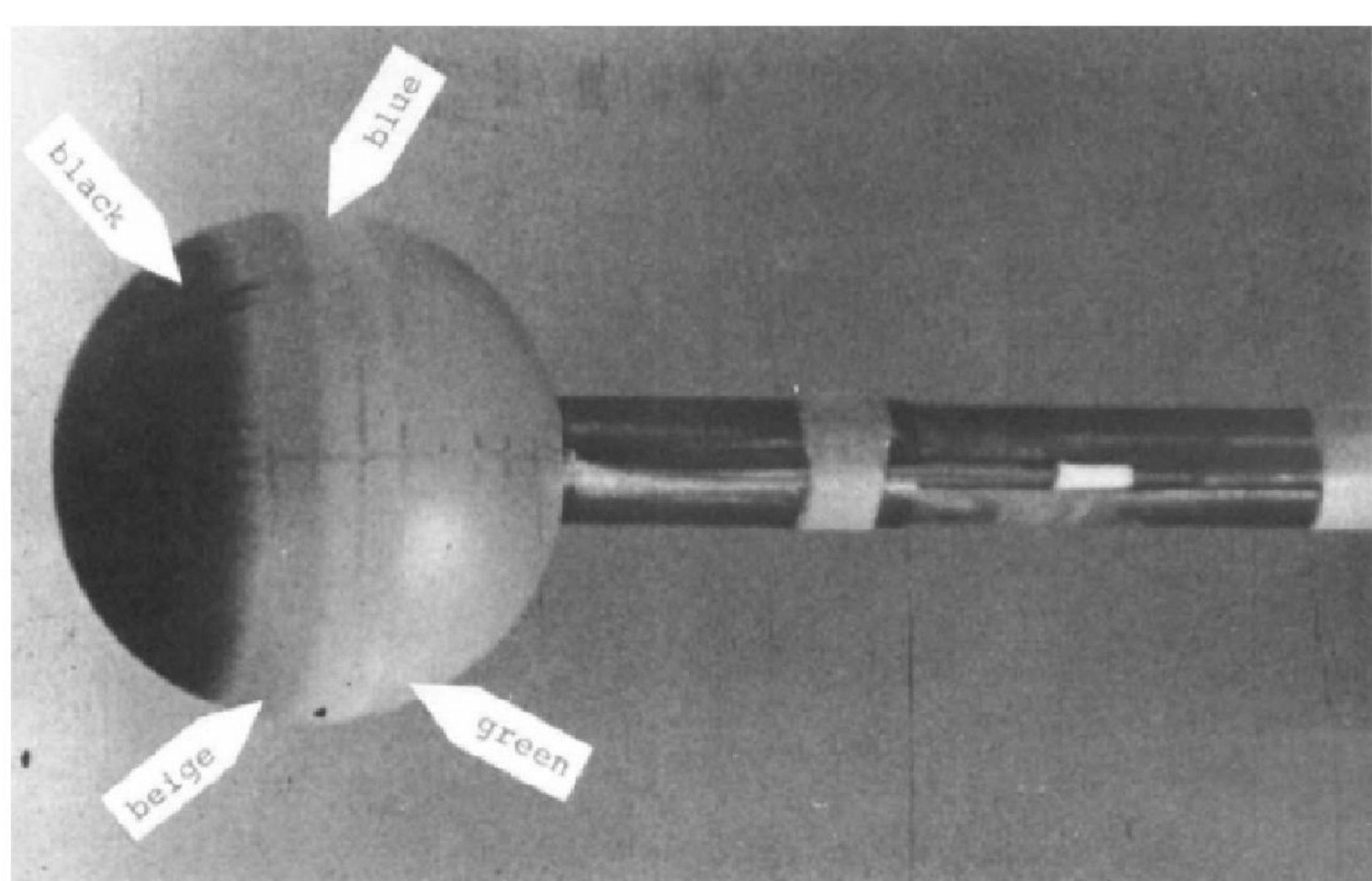
## Термо и барочувствительный покрытия



24.8

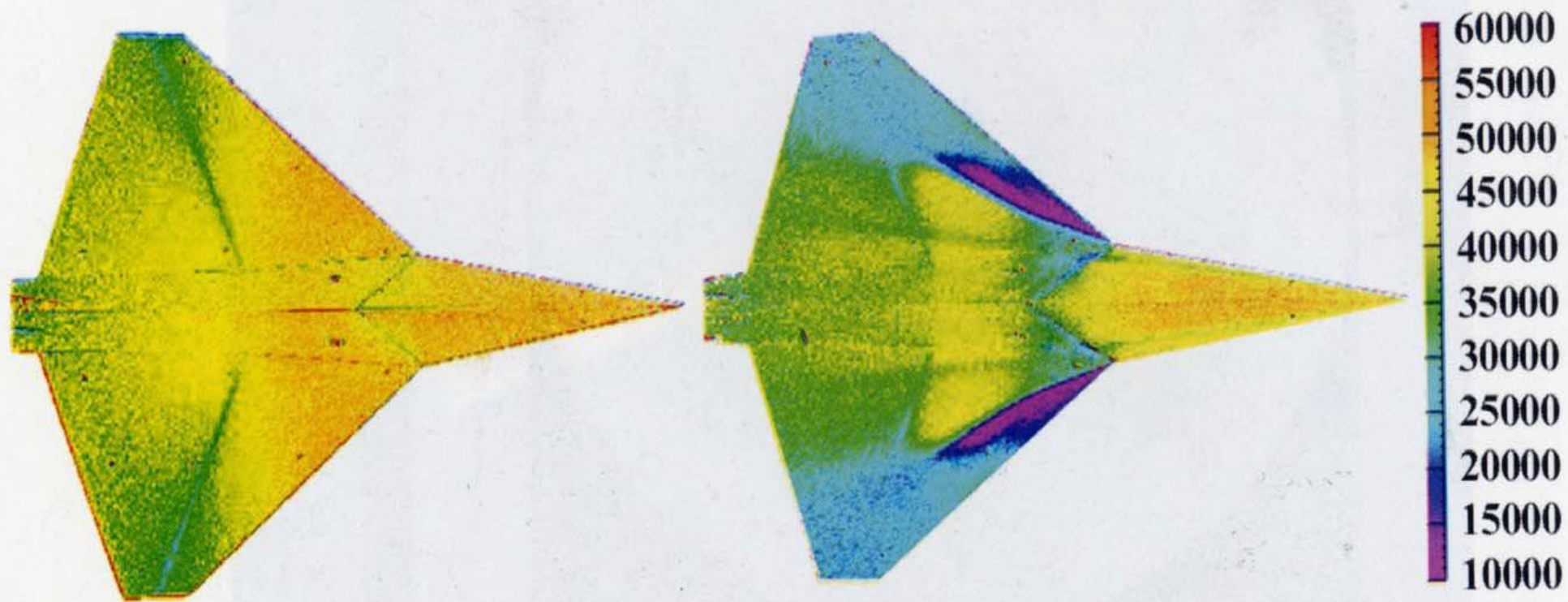
26.3C

*Рис. 3. Визуализация жидкими кристаллами*

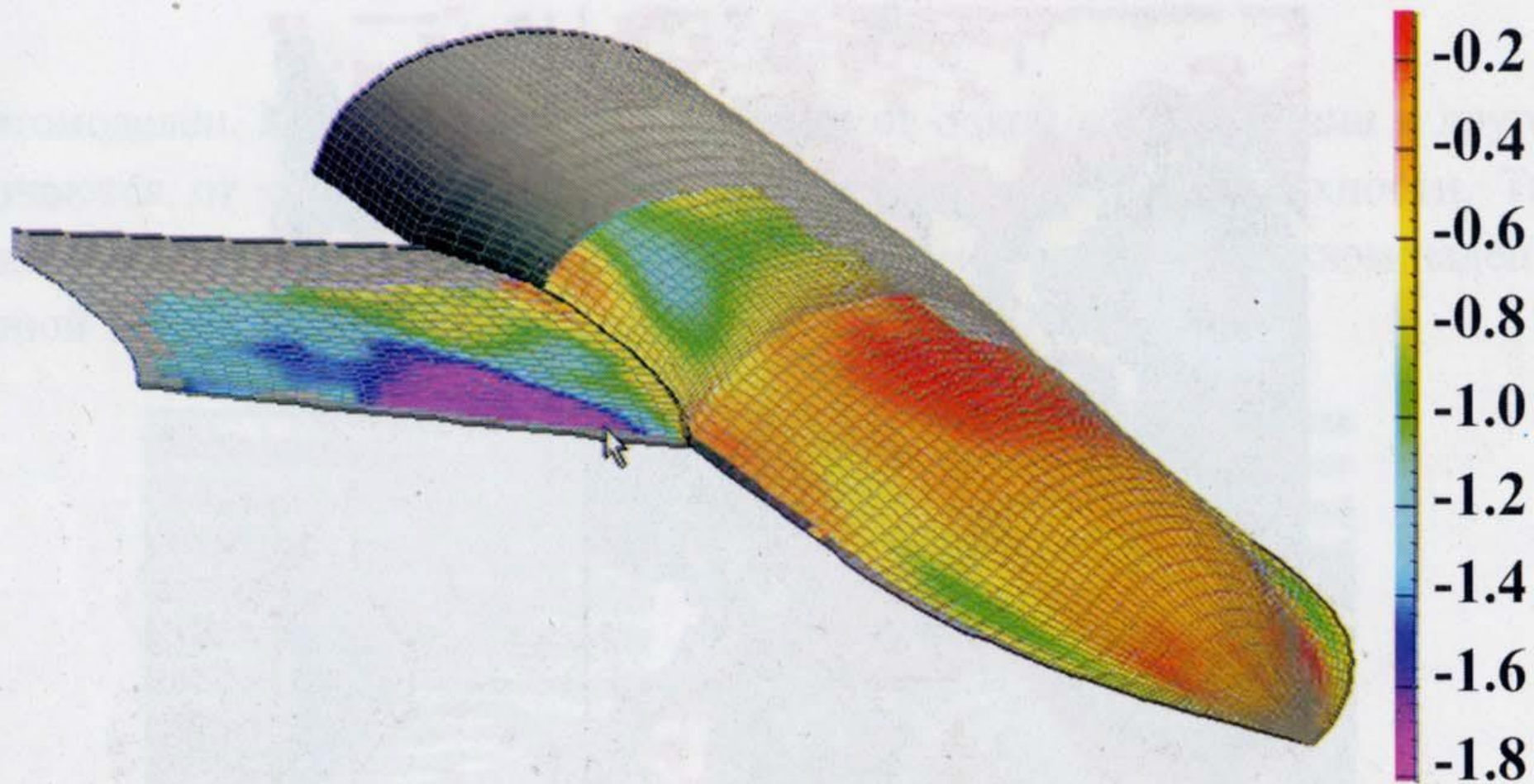


**Fig. 2.51** Pattern of thermosensitive paint on a sphere after 3 sec of exposure to a hypersonic, high-enthalpy flow; Mach number  $M = 10$ , stagnation temperature = 1000 K. (From Cérésuela *et al.*, 1965.)

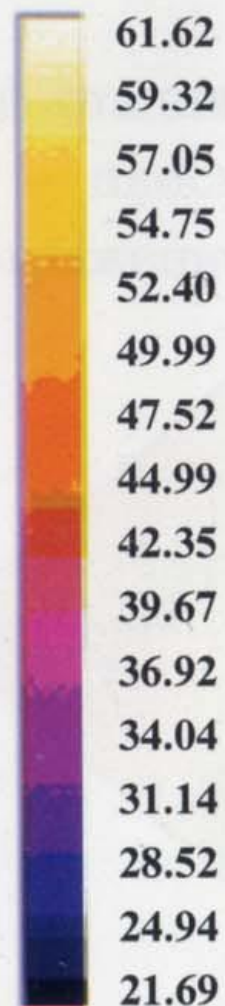
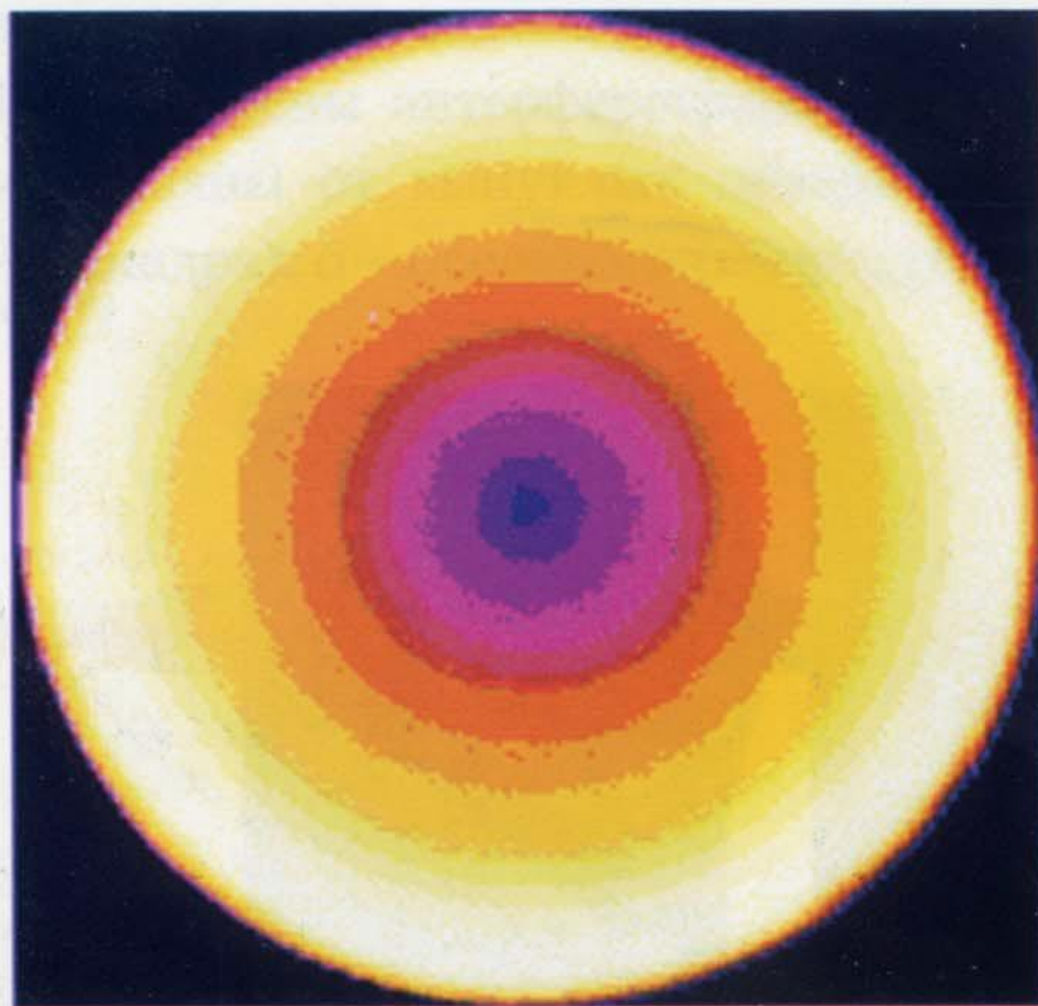




*Рис. 4. Поля давления на поверхности модели*



*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

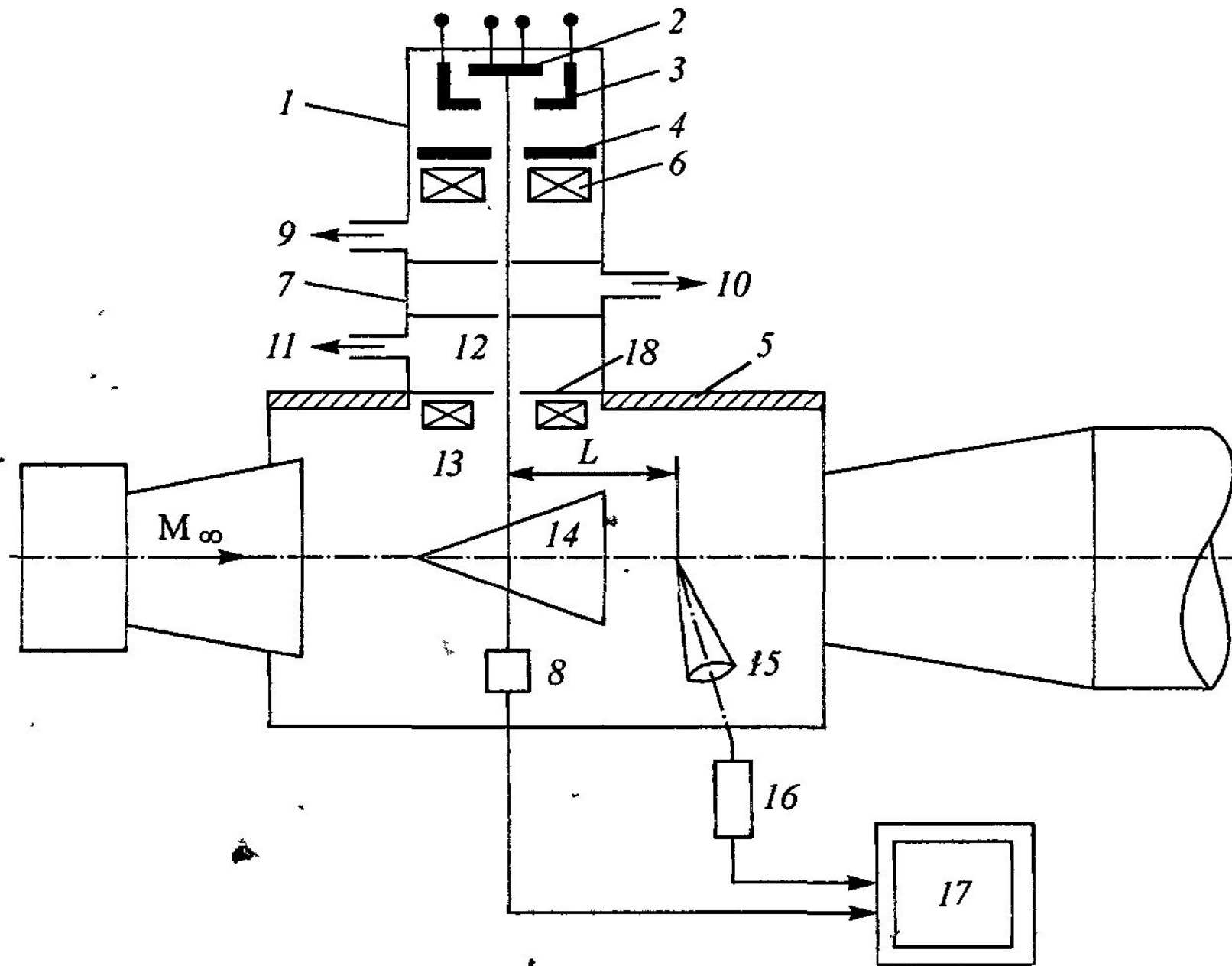
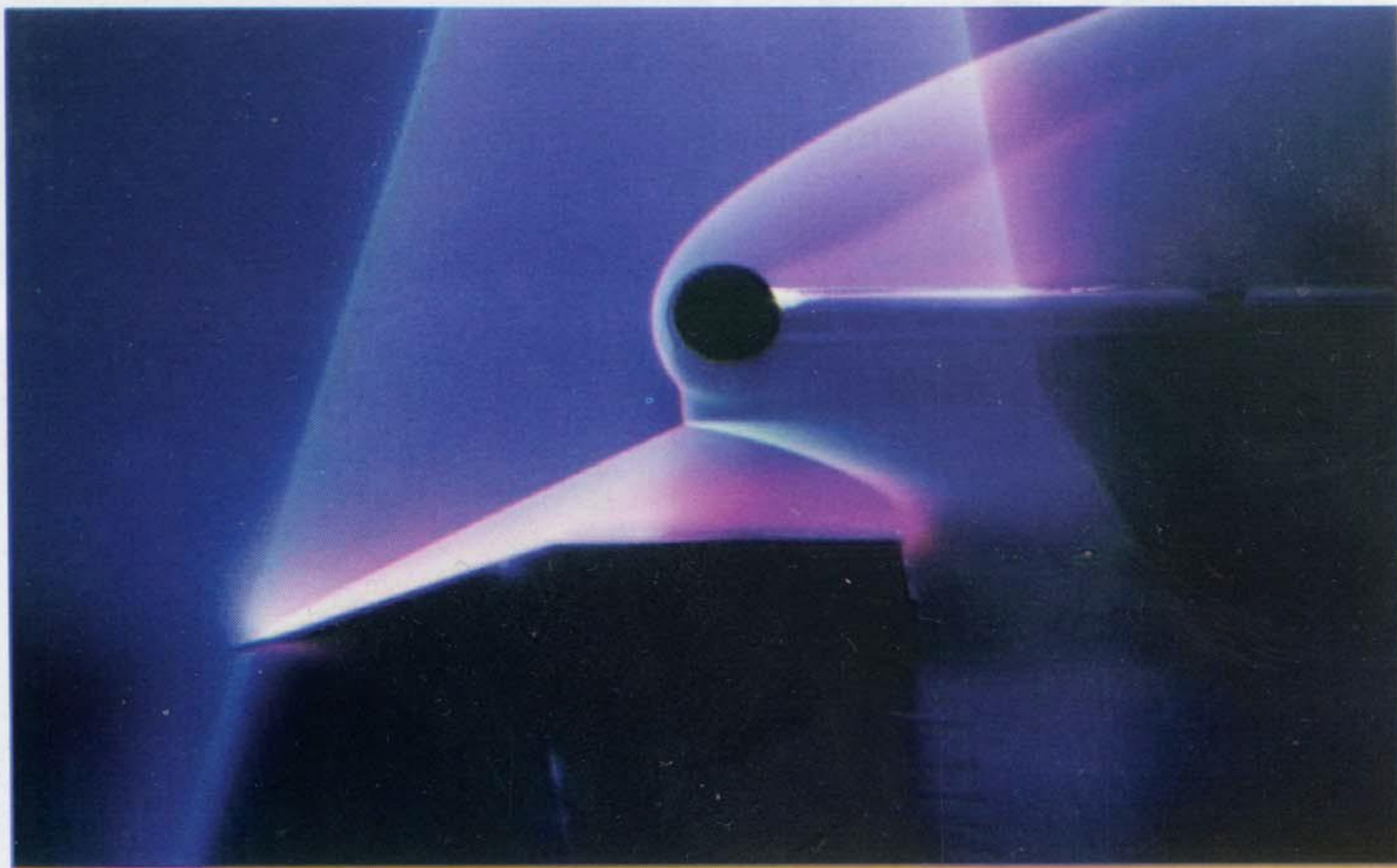


Рис. 6.33. Принципиальная схема системы создания электронного пучка



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