

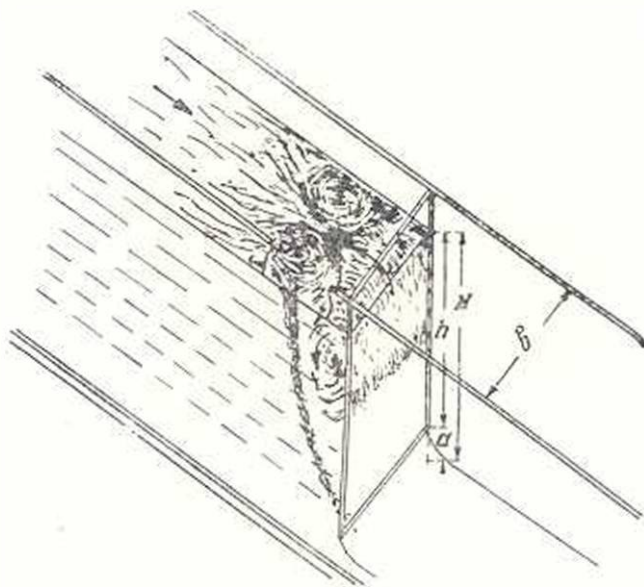
ГИДРАВЛИКА

С. М. Матинян (Исаакян)

Метод измерения пространственного поля скоростей в неустановившемся потоке в условиях воронкообразования

1. Введение

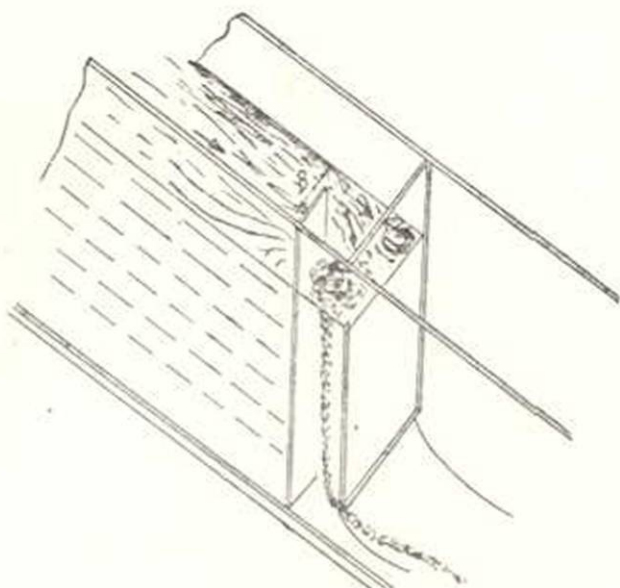
Воронки, которые образуются при истечении воды из отверстий как естественным путем (фиг. 1), так и искусственно, например, путем внесения в поток обтекаемых экранов по фиг. 2, периодически меняют свою интенсивность, тем самым создавая пульсирующее поле скоростей.



фиг. 1.

Учитывая, что воронка создаст пространственное пульсирующее поле скоростей, в современной технике гидравлической лаборатории не находим соответствующего способа измерения скоростей.

Известны способы фиксации: пространственного поля скоростей в стационарном потоке при помощи шарового зонда, плоского, но пульсирующего потока киносъемкой быстроходным аппаратом [1], фо-



фиг. 2.

тометрические методы, изображающие предметы стереопарой [2]. Однако, все они не удовлетворяют двум условиям одновременно, т. е. не фиксируют пространство и время параллельно.

Такой возможностью обладает стереокино, применение которого в лабораторной практике пока остается неосуществимым вследствие недоступности соответствующей аппаратуры.

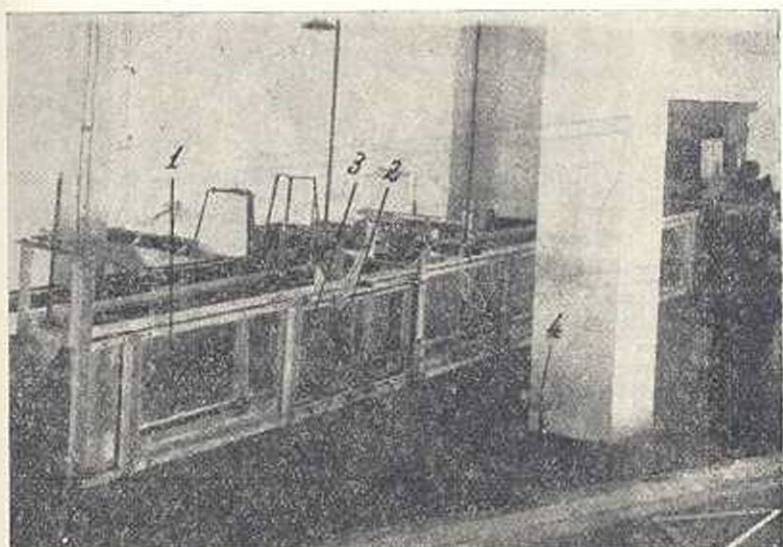
Однако в исследуемом нами сооружении (истечение из-под щита) оказываются другие возможности, которые позволяют получить пространственные координаты движущейся точки с помощью однообъективного киноаппарата и некоторых простых приспособлений.

2. Метод измерения скоростей в воронках

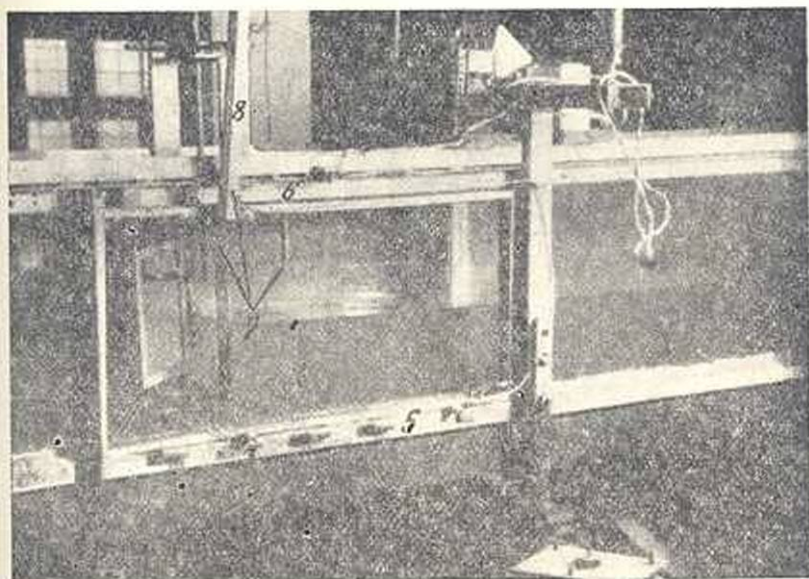
Имеем прямой лоток со стеклянными боковыми стенками. Вертикально опускаем приспособленный к подъемному механизму плоский щит из плексигласа (фиг. 3). Визуализируем частицу,двигающуюся в верхнем бьефе с помощью внесения в поток электрической лампочки малых размеров, привязанной к тонкой гибкой проволоке*. Одновременной фиксацией ее положения в каждый определенный момент времени в двух проекциях — со стороны стеклянной стенки лотка и с нормальной к ней стороны, — нижнего бьефа щита, можно восстановить движение частицы. При этом, в зависимости от величины чередующихся фиксаций и от величины скоростей, можно с определенной

* Цоколь с лампочки удален и объемный вес стеклянной части приведен к объемному весу воды с помощью покрытия поверхности металлической сеткой. Толщина провода составляет несколько микронов.

точно определить направление и величину вектора скорости в каждой зафиксированной точке.



Фиг. 3.



Фиг. 3а

Такая фиксация могла бы быть осуществлена с помощью двух простых киноаппаратов синхронизированного действия, при их расположении в указанных взаимно перпендикулярных направлениях.

Наличие в нашей лаборатории только одного такого аппарата заставило нас искать другое решение задачи, и с этой целью второй киноаппарат был заменен зеркалом, отражающим вторую проекцию

светящейся точки также в первый аппарат. Таким образом, нам удастся на одном кадре пленки получить обе проекции движущейся точки (в данный момент).

3. Теоретические основы методики

Направим оси X, Y, Z вдоль стенки лотка, по линиям пересечения плоскости щита со стенкой и с дном лотка. Со стороны нижнего бьефа под углом 45° к щиту (на плане) расположим зеркало внешнего отражения (фиг. 4).

Пусть имеется в потоке светящаяся точка A . Ее изображение в зеркале совпадает с точкой A_1 . При расположении аппарата в точке O на расстоянии l от лотка и при фокусном расстоянии аппарата F , точка A и ее зеркальное изображение A_1 на кинокадре располагаются в точках a и a_1 , ориентированных относительно указанных на кадре горизонтальной и вертикальной осей.

Из очевидного подобия двух пирамид, образованных лучами $Aa, A''a''$, вертикальной осевой плоскостью, плоскостью кинокадра и плоскостью XOZ , проходящей через точку A (с высотами F и $l+Y$) имеем:

$$\frac{X}{x} = \frac{Z}{z} = \frac{l+Y}{F}.$$

С другой стороны, по фиг. 5, изображающей зеркальное отражение A' точки A и их картин на пленке a и a' , имеем:

$$\frac{a_0 - Y}{y} = \frac{l + a_0 + Y}{F};$$

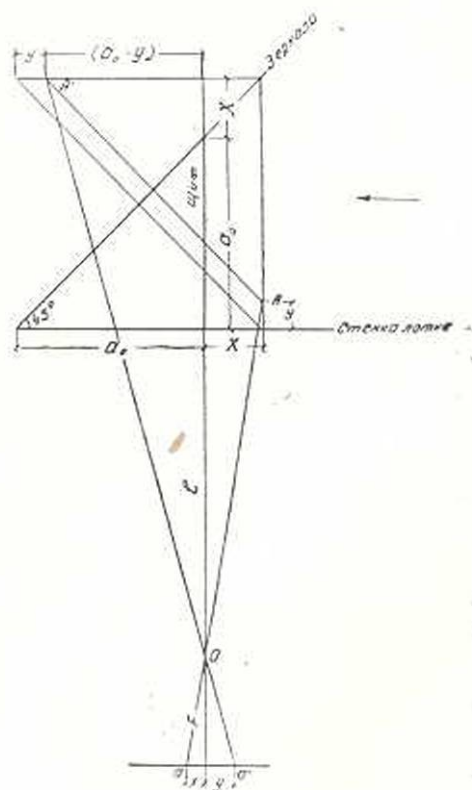
здесь X, Y, Z — координаты точки A в лотке,

x, y, z — координаты ее

на кадре,

a_0 — основание треугольника, образованного зеркалом, щитом и стенкой лотка.

Имея размеры установки l, a_0, F и x, y, z из кинопленки, легко определить все три координаты точки в лотке из выражений:



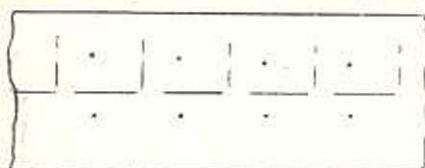
фиг. 5.

$$Y = \frac{1}{1 + \frac{xy}{F^2}} \left[a_0 - \left(\frac{l + a_0}{F} + \frac{lX}{F^2} \right) y \right],$$

$$X = \frac{1+Y}{F} x,$$

$$Z = \frac{1+Y}{F} z.$$

Снимая на киноплёнку движущуюся точку А, на каждом кадре получаем две проекции точки в данное мгновение (см. фиг. 6). Зная время



Фиг. 6.

прохождения точки от положения X_1, Y_1, Z_1 к положению X_2, Y_2, Z_2 , легко определить величину и направление вектора скорости в данное мгновение в данной точке из известных соотношений:

$$v = \frac{1}{t} \sqrt{(X_2 - X_1)^2 + (Y_2 - Y_1)^2 + (Z_2 - Z_1)^2}.$$

$$\cos(v, X) = \frac{X_2 - X_1}{t |v|},$$

$$\cos(v, Y) = \frac{Y_2 - Y_1}{t |v|},$$

$$\cos(v, Z) = \frac{Z_2 - Z_1}{t |v|}.$$

В приведенных рассуждениях мы не учли то обстоятельство, что лучи, идущие к аппарату от светящейся точки, проходят путь через разнородную среду и на поверхностях раздела этих сред претерпевают преломление.

При рассмотрении этого вопроса основываемся на известных положениях геометрической оптики [3]:

1. Законе Декарта-Снелля, гласящем, что как луч, падающий на плоскость, так и лучи, отраженные и преломленные, находятся в одной плоскости вместе с нормалью, восстановленной к плоскости преломления или отражения в точке падения луча.

2. Принципе Ферма о том, что луч проходит по такому пути, где длина оптического пути имеет экстремальное значение.

Основываясь на первом положении, заключаем, что координаты X и Z , полученные от картины действительной точки на кадре, не искажаются.

Имея в виду первый и второй принципы, приходим к выводу, что координата y на пленке, соответствующая действительному значению $(a_0 - Y)$, получается также без искажения.

Таким образом приходим к выводу, что при предложенной схеме использования зеркала с киноаппаратом удастся определить все

три координаты точки в пространстве и во времени, избегнув как сложной аппаратуры, так и кропотливых вычислений.

4. Опытная установка

Опытная установка состоит из:

1. *Лотка*, длиной 10 м, шириной 20 см, глубиной 50 см. Шарнирно закрепленного одним концом, а другим подвешенного к междуетажному перекрытию на подвесках, с возможностью изменять уклон дна лотка (фиг. 3).

Боковые стенки лотка стеклянные, толщиной 0,7 см, дно деревянное. Они собраны в металлическом каркасе. Вода подается из общей циркуляционной системы лаборатории. Расход воды измеряется треугольным водосливом.

2. *Щита* — плоского, прозрачного (из плексигласа), толщиной 0,4 см. Размеры щита 20×30 см. Он перекрывает всю ширину лотка. Щит снабжен подъемным механизмом и опирается на упоры из полосового железа, плотно прилегающие к стенкам лотка. Положение щита строго вертикальное; углы между щитом и боковыми стенками лотка прямые (фиг. 3).

3. *Зеркала* — внешнего отражения, размерами 20×23 см. Оно помещено в деревянной раме, привешенной к щиту со стороны нижнего бьефа и имеющей вращение вокруг вертикальной стороны, прилегающей к щиту. Угол между зеркалом и щитом равен 45° . Зеркало имеет подтяжку для его грубой фиксации, а также винты для микрорегулировки его положения.

4. *Киноаппарата* марки Iуто с одним объективом. Фокусное расстояние объектива $F = 47$ мм. Для установки аппарата с левой стороны объектива приделана визирная труба, ось которой составляет некоторый угол с оптической осью объектива. Для центрировки аппарата в центре объектива визирной трубы имеются взаимно перпендикулярные пересекающиеся нити. Аппарат жестко привинчивается к стенду, имеющему регулировку в горизонтальной плоскости. Стенд сидит на треноге, которая имеет возможность жесткой фиксации на плане, а на ней с помощью специальной рукоятки стенд может перемещаться по вертикали.

5. *Координатной системы* — для ориентировки положения точки в отношении неподвижной системы (так как съемка производится в темноте и видна только движущаяся частица). Она представляет собой хромоникелевую проволоку, натянутую по горизонтальному дну лотка и по линии пересечения верхней плоскости щита со стенкой лотка.

Путем экранирования раскаленной проволоки через каждые 10 см на длине 5 см горизонтальная ось разделяется на отрезки, позволяющие определить масштаб (фиг. 3а).

6. *Линейных шкал* по осям ОХ и ОУ.

7. *Откидной рамы* с жестко соединенными двумя лампочками и вертикального стержня с жестко соединенной одной лампочкой (по 6,5 вольт) для установки зеркала.

8. *Лампочки с рамой* для центрировки аппарата (фиг. 3а).

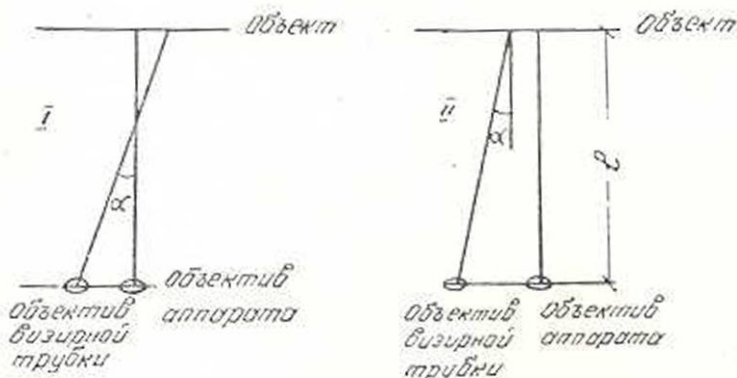
5. Наладка установки

После установления высоты открытия щита и расхода воды аппарат приводится в горизонтальное положение. Грубо устанавливается зеркало под углом 45° к щиту, затем оптическим способом уточняется его положение.

Для этого устанавливаются две светящиеся точки в области зеркала вне лотка, закрепленные к проволоочной раме 7 и имеющие горизонтальное расположение; совмещается горизонтальная линия креста визирной трубки аппарата с ними. Помещается другая светящаяся точка в верхнем бьефе с таким расположением, чтобы ее изображение в зеркале совпало бы с изображением одной из вышеуказанных точек и фиксируется ордината у этой точки. Затем, эта точка передвигается параллельно оси ОУ на расстояние, соответствующее расстоянию двух закрепленных точек у зеркала. При этом должны иметь совпадение второй из этих точек со вторым расположением движущейся точки в зеркальном изображении.

На этой основе последующими попытками уточняется положение зеркала микродвижениями.

Последующим шагом центрируется киноаппарат, т. е. объектив аппарата направляется в центр области, подлежащей съемке.



фиг. 7.

Габариты съемки определяются с помощью визирной трубки. Ее ось составляет некоторый угол с оптической осью объектива, поэтому в общем случае ожидается отклонение рамы съемки от наблюдаемой через визирную трубку.

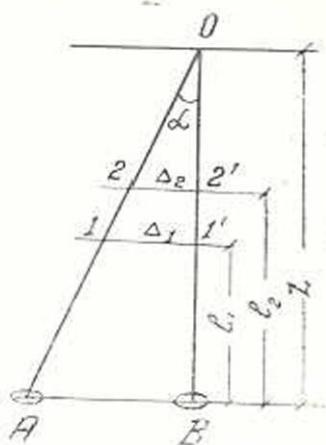
В зависимости от величины угла α и расстояния аппарата от объекта возможны два случая отклонения лучей (фиг. 7). Первый слу-

чай будет иметь место при больших углах α или больших расстояниях l , второй — наоборот.

Предварительные съемки показали, что в нашем случае ($l = 1$ м) имеет место вторая схема.

По фиг. (8) пусть А — объектив визирной трубы, В — объектив киноаппарата; ОА и ОВ — оптические оси визирной трубы и киноаппарата. 1—1 — плоскость размещения объекта на расстоянии l_1 , 2—2 — плоскость размещения объекта на расстоянии l_2 от аппарата.

Если фокусное расстояние объектива аппарата F , то, согласно фиг. 8, будем иметь расхождение оптических осей ОА и ОВ на расстоянии l_1 :



фиг. 8.

$$\Delta_1 = \frac{l_1}{F} \Delta_1^1, \quad (1)$$

где Δ_1^1 — расхождение осей на пленке.

На расстоянии l_2 это же расхождение:

$$\Delta_2 = \frac{l_2}{F} \Delta_2^1, \quad (2)$$

где Δ_2^1 — величина Δ_2 на пленке.

Исходя из подобия треугольников $O11'$ и $O22'$ (учитывая, что $11'$ параллельна $22'$) будем иметь:

$$\frac{O1^1}{O2^1} = \frac{\Delta_1}{\Delta_2}, \quad (3)$$

откуда

$$O2^1 = \frac{O1^1 - O2^1}{\Delta_1 - \Delta_2} \Delta_2. \quad (4)$$

Определив после двукратной съемки Δ_1^1 и Δ_2^1 и вычислив Δ_1 и Δ_2 по приведенным выше соотношениям (1) и (2), а также учитывая, что $O1^1 - O2^1 = l_2 - l_1$, получим:

$$O2^1 = \frac{l_2 - l_1}{\Delta_1 - \Delta_2} \Delta_2.$$

Тогда легко определить смещение двух осей Δ на расстоянии аппарата l .

$$\Delta = (L - l) \cdot \operatorname{tg} \alpha,$$

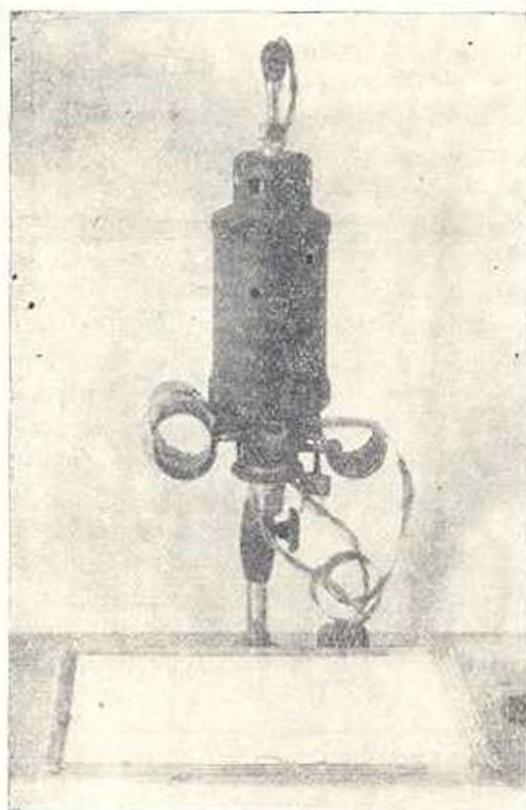
где

$$L = l + O2^1, \operatorname{tg} \alpha = \frac{\Delta_2}{O2^1}.$$

Центрированием визирной трубки аппарата с таким эксцентриситетом достигается совмещение центров намеченной области съемки и кадра.

6. Производство опыта

После наладки установки и центрирования аппарата убираются из области съемки вспомогательные лампочки со своими рамами,



фиг. 9.

предназначенными для наладки установки. Остается одна лампочка, установленная в верхнем бьефе с фиксированным значением координаты y .

Выключается свет. Короткой очередью съемки фиксируется положение этой светящейся точки на пленке для вычисления z_0 .

Убирается и эта лампочка. Зажигается лампочка-поплавок, свободно привешенная к тонкой длинной проволоке.

Лампочка опускается в воду за пределами поля съемки аппарата и одновременно начинается съемка. Лампочка, свободно двигаясь вместе с водой, у щита притягивается к воронке, затем, вращаясь, увлекается ее шлейфом в нижний бьеф.

Движение лампочки фиксируется на кинопленке, каждый кадр которой успевает охватить одно мгновенное положение лампочки в виде точки. Для примера на фиг. 6 приведена копия нескольких смежных кадров.

Скорость съемки—24 кадра в секунду.

7. Обработка экспериментального материала

После проявки кинопленки обработка съемки заключается в определении координат x , y , z точки на каждом кадрике.

Для увеличения точности измерений обработка производится на увеличенных кадрах. Для сокращения времени обработки последние

производится непосредственно на увеличителе к фотоаппарату ФЭД У-2, приспособив к нему специальный экран.

Экран, изображенный на фиг. 9, имеет горизонтальную и вертикальную шкалы с нониусами, точность отсчета по которым составляет 0,1 мм.

Имея на кадрике величину 10 см натуры, соответствующую длине пиктира, составляющего горизонтальную ось, первым шагом устанавливаем степень увеличения кадра на экране, приложенном к У-2, затем читаем координаты точки x , z с одной проекции и y с другой. При наличии такого материала и скорости съемки определение величины и направления скорости в каждой точке, пройденной лампочкой, не представляет никакой трудности (см. § 3).

Водно-энергетический институт

АН Армянской ССР

Поступило 4 VI 1954

ЛИТЕРАТУРА

1. Минский Е. М. Турбулентность руслового потока. Гидрометеиздат, 1952.
2. Федоров Н. Н. Опыт применения стереофотограмметрии к экспериментальному изучению скоростной структуры водных потоков, Труды ГПИ, в. 28 (82), 1951.
3. Папалевский Н. Д. Курс физики, т. 2, 1947.

Ս. Մ. Մանուկյան (Խառնակյան)

ԶԱԳԱՐԱԳՈՅԱՑՄԱՆ ՊԱՅՄԱՆՆԵՐՈՒՄ ԶԿԱՅՈՒՆԱՑԱԾ ՀՈՍԱՆՔՈՒՄ ԱՐԱԳՈՒՅՈՒՆՆԵՐԻ ՏԱՐԱԾԱԿԱՆ ԴԱՇՏԻ ԶԱՓՄԱՆ ՄԵԹՈԴ

Ա Մ Փ Ո Փ Ո Ւ Մ

Զարգացողացման պայմաններում հեղուկի շարժման արագության դաշտը ներկայացնում է փոփոխական տարածական պատկեր: Այդ դաշտի ֆիքուման համար դոյուբյուն չունի չափման համապատասխան միջոց:

Առաջագրված խնդիրը հաղվածում լուծված է պարզ կինոապարատի և արտաքին անդրադարձման հայելու միջոցով, որոնց հարմար փոխդասավորությամբ հաջողվել է շարժվող կետի տարածական կոորդինատներն ստանալ յուրաքանչյուր $\frac{1}{24}$ վայրկյանում, միաժամանակ խոստովելով մանրակրկիտ հաշիվներից և բարդ տպարատուրայից:

Փորձնական հիդրոդինամիկայի ասպարեզում ավյալ մեթոդն ունի քննհանուր կիրառական նշանակություն: