

УДК 53.08

КИНЕМАТИЧЕСКИЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ СКОРОСТИ ПОТОКА

Игольников А.А.

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н.Ельцина

Аннотация: для измерения скорости среды в трубах или каналах применяются различные методы, один из которых рассматривается в данной работе. Кинематический метод измерения скорости является одним из простейших, поскольку он основывается на измерении времени прохождения меткой известного расстояния или пройденного расстояния (между источником меток и детектором или между двумя детекторами) за заданное время. Кроме того, он является универсальным, т.к. его можно применять при измерениях скорости агрессивных сред, а также систем, которые находятся в различных агрегатных состояниях, например газы, жидкости или плазма. Под меткой понимается инородное тело, помещенное в исследуемую среду или элемент объема, который обладает свойствами, позволяющими отслеживать его движение. Метки создаются путем ионизации исследуемой среды, внедрения радиоактивных изотопов или частиц с оптическими свойствами, отличающимися от оптических свойств среды, намагничивания внешним магнитным полем некоторого объема, создания тепловых неоднородностей и т.д. Целью данной работы является выявление преимуществ и недостатков данного метода, а также обзор основных типов меток и физических явлений, на основе которых они [метки] используются.

Ключевые слова: кинематический метод, скорость, поток, течение, жидкость, газ, плазма, ионизация, радиоактивный изотоп, ядерный магнитный резонанс, тепловые неоднородности, окрашенные жидкости.

KINEMATIC METHOD OF MEASURING FLOW VELOCITY

Igolnikov A.A.

Ural federal university named after the first President of Russia B.N. Yeltsin

Annotation: for measuring fluid velocity in pipes or channels by using different methods, one of which is examined in this work. Kinematic method of measuring speed is one of the simplest because it is based on measuring the time of passage mark a known distance or the distance traveled (between the source of labels and the detector or between the two detectors) in a given time. In addition, it is versatile, because it can be used during velocity measurements of aggressive media and systems, which are in different aggregate States, for example gases, liquids or plasmas. Under the label refers to a foreign body placed in the medium under test or a volume element that has properties that allow it to track its movement. Labels are created by ionization of the medium under study, the introduction of radioactive isotopes or particles with optical properties different from optical properties of the medium, the magnetization by the external magnetic field of a certain volume, create

thermal inhomogeneities, etc. The aim of this work is to identify the advantages and disadvantages of this method, as well as an overview of the main types of places and physical phenomena on the basis of which they [the labels] are used.

Различные методы измерения скорости широко применяются в технике, в частности при измерении расхода жидкости (газа) в трубах или каналах. Их можно разделить на несколько групп: кинематические, динамические и физические методы измерения скорости. Каждая из них обладает рядом особенностей, которые отличают их среди остальных.

Кинематические методы основываются на измерении либо времени прохождения меткой известного расстояния, либо пройденного расстояния за заданное время. Под меткой понимается инородное тело, помещенное в исследуемую среду или элемент объема, который обладает свойствами, отличающимися от некоторых свойств среды, что позволяет отслеживать движение этого объема. В связи с этим, расходомеры, основанные на кинематическом методе измерения скорости, называют меточными расходомерами в виду его особенностей.

Динамические методы, в свою очередь, связаны с непосредственным взаимодействием исследуемой среды с измерительным прибором (трубкой Пито, нитью накала и т.д.), т.е., как следует из названия метода, он основывается на динамическом взаимодействии измеряемого потока и зонда, с помощью которого проводятся измерения. Помимо зонда, в качестве источника взаимодействия применяются электрические и магнитные поля, в том случае, если среда является электропроводящей. В качестве прибора для измерения широко используются трубки Пито, предназначенные для измерения скоростного напора, т.е. давления, которое создает движущийся поток в точке его торможения. Это давление связано со скоростью набегающего потока, что и позволяет производить измерения. Кроме трубок Пито, применяются нити накала, чаще всего они изготавливаются из платины, по причине того, что существует практически линейная зависимость между сопротивлением нити и ее температурой нагрева. Соответственно зная сопротивление нити, можно с легкостью узнать, какую температуру при этом она имеет. Исследуя теплообмен между зондом и измеряемой средой или между двумя зондами, расположенными на некотором расстоянии друг от друга, можно судить о скорости потока, в котором они находятся.

Физические методы отличает тот факт, что измерение скорости основывается на каких-либо физических процессах, протекание которых зависит от скорости потока. Однако сложность заключается в том, что зачастую определенный физический параметр зависит не только от скорости потока, но и от других параметров, например температуры и давления.

Это необходимо учитывать при проведении измерений. Следовательно, наблюдая за изменениями, можно вычислить необходимый параметр среды, а именно скорость. Измерения, как правило, производятся без внедрения зондов в среду, т.е. она [среда] не возмущается. Чаще всего в данном методе используется явление доплеровского сдвига, возникающего при пропускании высокочастотных акустических волн через поток. Причиной сдвига является рассеяние волн на взвешенных частицах среды. Этими частицами обычно являются пыль или примеси. Пропускаются через среду именно высокочастотные волны, поскольку они имеют наименьший коэффициент затухания. По доплеровскому сдвигу можно найти скорость потока. Кроме этого, для измерения применяются устройства, основанные на эффекте Физо. Этот эффект связан с влиянием движущегося потока на скорость электромагнитного излучения.

Поговорим более подробно о первом методе измерения скорости потока, а именно: о его преимуществах, недостатках и типах применяемых меток.

Кинематический метод измерения скорости обладает рядом преимуществ, в результате чего он имеет широкую область применения. Прежде всего, его использование не вносит каких-либо возмущений в среду, т.к. он является беззондовым. Это означает, что в поток не помещаются приборы для измерения скорости, которые могут привести к изменению направления движения, возникновению турбулентных течений и ударных волн. Соответственно отсюда вытекает еще одно преимущество: кинематический метод может быть применен в достаточно большом диапазоне скоростей, поскольку наибольшие возмущения возникают при скоростях потока, превышающих скорость звука в среде. Кроме того, кинематический метод может применяться для измерения скорости различных типов сред (жидкости, газы, плазма).

Наиболее простое применение данного метода – это измерение скорости течений в океане посредством измерения положения в пространстве и во времени поплавков движущихся в потоке воды. Для измерения характеристик течений используются различного рода поплавки, которые могут запускаться как на поверхность воды, так и на требуемую глубину[1]. Скорость потока считается равной скорости движения метки.

Также в качестве метки может быть использована область среды, в которой концентрация ионов выше, чем во всех остальных областях. Это позволяет применять данный метод не только для измерения скорости течения жидкости, но и газов. Отслеживая движение этого объема, можно определить его скорость. Для того чтобы концентрация ионов была велика, т.е. достаточна для регистрации, применяют несколько методов для

ионизации элемента объема: применение радиоактивных изотопов (источников β -излучения) и пропускание электрического разряда. Таким образом, происходит ионизация частиц среды посредством электронного удара: электроны, сталкиваясь с атомами, выбивают с электронных оболочек электроны атома, вследствие чего он становится положительно заряженным. Кроме этого, применяется также ионизация фотонами: они, имея энергию большую, чем энергия вылета электрона из атома, выбивают его [электрон] с электронной оболочки, тем самым ионизируя атом. Зная расстояние между источником разряда и регистрирующим устройством или расстояние между двумя регистрирующими устройствами, и время прохождения ионами среды этого расстояния, можно найти скорость этой области течения. В качестве регистрирующих устройств могут применяться конденсаторы, по разрядке которых фиксируется наличие ионов в области между обкладками[2]. Недостатком данного типа меток является ограниченное время существования метки, поскольку происходит рекомбинация ионов, что влечет за собой необходимость поддержания малого расстояния между источником и приёмником (порядка 1 метра), а от этого страдает точность производимых измерений[3].

Помимо ионизации, для измерения скорости среды (жидкостей, газов) применяется внедрение радиоактивных изотопов. В поток впрыскивается радиоактивный газ, чаще всего используется радон или вводятся твёрдые тела, которые обладают плавучестью, но при этом содержат некоторое количество радиоактивных изотопов. Данный тип меток часто используют для измерения скорости движения жидкой или газовой среды в труднодоступных для установки каких-либо других измерительных приборов объектах, например в доменных печах, ракетных двигателях, газопроводах, при проведении глубоководных исследований морских течений, а использование гамма-излучающих препаратов позволяет регистрировать движение меток даже через металлические стенки конструкций[4]. Соответственно разместив два регистратора ионизирующего излучения, например счётчики Гейгера или сцинтилляционные счётчики на заданном расстоянии друг от друга и, фиксируя время прохождения изотопами этого расстояния, можно узнать скорость метки, а значит и скорость течения, в котором эта метка находится[4]. Особенностью данного типа меток является необходимость сопоставить период полураспада радиоактивного элемента, его активность и расстояние между регистраторами ионизирующего излучения таким образом, чтобы за время прохождения заданного расстояния элемент не распался, и его активность не уменьшилась до уровня фонового излучения. Так как в данном случае измерить скорость течения не удастся.

При измерении скорости течения жидкости кинематическим методом широко используется явление ядерного магнитного резонанса, которое наиболее ярко проявляет себя

в водородсодержащих средах. Метки создаются путём поляризации ядер жидкости во внешнем магнитном поле. Если в конце измерительного участка трубопровода расположить датчик ядерного резонанса, то при соблюдении определенных условий амплитуда сигнала будет пропорциональна намагниченности ядер. Быстрое изменение поляризации жидкости, произведенное вначале измерительного участка, вызовет через некоторое время соответствующее изменение амплитуды сигнала ядерного резонанса[5]. Проблема применения данного явления заключается в том, что измерение поляризации ядер происходит длительное время, порядка нескольких секунд. Это, в свою очередь, может привести к большой погрешности измерений. Для того чтобы этого избежать, производят искусственную деполяризацию ядер действием резонансного осциллирующего поля, а именно: перед прохождением жидкости через участок, на котором проводится измерение скорости, ее поляризуют сильным магнитным полем, а в начале этого участка помещают радиочастотную катушку. Инициировав резонансное осциллирующее поле в этой катушке, можно вызвать быструю деполяризацию или переполаризацию жидкости, а выключив это поле – быструю поляризацию[5].

К распространенным типам меток также относят так называемые тепловые метки. Они применяются для измерения скорости или расхода жидкости или газа[3]. Метку создает нагреватель, либо она вводится извне, т.е. некоторый объем жидкости или газа предварительно нагревается в отдельном резервуаре, а затем помещается в измеряемую среду. После этого термопреобразователи фиксируют время, за которое она пройдет заданное расстояние. Применяются конструкции и без нагревателя, тогда в качестве метки выступают тепловые неоднородности, возникающие в результате некоторых флуктуаций в среде, что характерно для турбулентных течений. Это связано с тем, что турбулизация потока приводит к возникновению еще одного вида передачи тепла в среде помимо теплопроводности и конвекции – перенос тепла турбулентными массами. Соответственно фиксируя движение этих масс, можно судить о скорости потока. Но может возникнуть ситуация, когда неоднородности будут неотличимы друг от друга из-за их высокой интенсивности, что негативно повлияет на их регистрацию и, как следствие, значение скорости потока. Удобство использования данного типа меток заключается в том, что нагреватель может находиться как внутри канала, так и снаружи, поскольку это позволяет несколько упростить конструкцию измерительного прибора.

Метками могут служить вещества, обладающие оптическими свойствами, отличными от свойств измеряемой среды. В больших и средних трубопроводах оптические метки занимают лишь некоторую часть потока, но в случае с трубами малых диаметров (порядка 10 мм) метка может перекрывать все сечение потока. Ими могут быть алюминиевая

стружка, плексигласовый или алебастровый порошок, окрашенные жидкости или различные эмульсии, например эмульсия из вазелинового масла и хлорбензола, которая в потоке воды превращается в шарики диаметром 2-2,5 мм. Индикаторы подбирают таким образом, чтобы их плотности были близки к плотности измеряемой жидкости. Кроме того, существуют разные способы образования меток в измеряемом веществе: если поток содержит флуоресцирующие частицы, то метки создаются с помощью периодического излучения через прозрачные для этого излучения стекла[3].

Метка может создаваться путем намагничивания некоторого объема среды, в этом случае в качестве регистраторов применяются катушки индуктивности. Когда намагниченный объем проходит через каждую из этих катушек, в них возникает ток, по наличию которого можно судить о перемещении метки. Зная расстояние между катушками и фиксируя время возникновения тока в каждой катушке, мы можем найти скорость потока, в котором движется намагниченный объем.

Из всего вышесказанного можно сделать вывод, что кинематический метод измерения скорости является наиболее простым. Это связано с тем, что скорость метки находится как отношение пройденного пути к затраченному времени, а скорость среды принимается равной скорости этой метки. Кроме того, установки отличаются конструкционной простотой и минимумом подвижных частей.

Метод является универсальным, поскольку его можно применять при измерениях скорости агрессивных сред, а также систем, которые находятся в различных агрегатных состояниях (жидкость, газ, плазма).

Необходимо упомянуть о недостатках, которые связаны с точностью измерений. Она, в свою очередь, зависит от длины исследуемого участка течения: чем длиннее участок, тем точнее определяется значение скорости. Но при использовании меток определенного типа, их время существования, т.е. время, в течение которого детектор зафиксирует неоднородность среды, ограничено. Соответственно отсюда следует, что необходимо выбирать параметры так, чтобы скорость была определена наиболее точно с учетом особенностей применяемых меток.

Таким образом, были рассмотрены основные преимущества и недостатки кинематического метода измерения скорости потока, а также типы меток, которые получили наибольшее распространение в технике.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Коровин В.П. Зарубежные технические средства в океанологии : [Учеб. пособие для вузов по направлению "Гидрометеорология", спец. "Океанология"] / В. П. Коровин; Рос. гос. гидрометеорол. ин-т. – СПб. : РГГМИ, 1994. – 195 с.
2. Добрынин Д.В., Тихомиров А.А. Регистрация ионов в воздушно-плазменном потоке методом разрядки аспирационного конденсатора. – Тезисы докладов ВНКСФ-9, 2003.
3. Долгирев Ю.Е. Измерение физических параметров учеб. пособие / Ю.Е. Долгирев. – Екатеринбург: УрФУ, 2012. – 111 с.
4. Кремлевский П. П. Расходомеры и счетчики количества веществ: Справочник: Кн. 2 / Под общ. ред. Е. А. Шорникова. — 5-е изд., перераб. и доп. — СПб.: Политехника, 2004. — 412 с.
5. Жерновой А. И. Ядерный магнитный резонанс в проточной жидкости [Текст] / А. И. Жерновой, Г. Д. Латышев. - Москва : Атомиздат, 1964. - 253 с.