

РАЗРАБОТКА СТРАТЕГИИ ВЕРТИКАЛЬНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ МЕЛКОМАСШТАБНЫХ ТУРБУЛИЗИРОВАННЫХ ПРОСЛОЕК

Зори А.А., Савкова Е.О. ✓

Донецкий национальный технический университет, г. Донецк
кафедры «Электронная техника», «Автоматизированные системы управления»

Abstract

Zory A.A., Savkova E.O. Development of vertical depth sounding strategy based on the small-scale vertical layers mathematical models. The problem of small-scale turbulence distribution parameters mathematical model use for vertical depth sounding strategy determination during hydrophysical experiments is discussed. The developed system enables tuning of sonde sinking speed or (and) sensors sample rate to increase the accuracy of experimental data characterizing vertical layers.

Актуальность. Турбулентность остается одним из наиболее сложных объектов исследования механики жидкости и газа. За почти столетнюю историю ее изучения предложены десятки различных подходов, почти всегда отражающие наиболее активно развиваемые перспективные направления математики и физики соответствующего периода времени. Статистическая физика и теория вероятности, теория размерности, Фурье анализ и прямые численные методы, теория динамических систем, теория фракталов и вейвлет-анализ - вот далеко не полный перечень областей науки, которые давали основные идеи исследователям турбулентности.

Теория турбулентности далека от своего завершения. Продолжают появляться и все новые подходы к ее изучению. Растет число моделей, предлагаемых для лучшего понимания отдельных ее свойств. Турбулентность – явление, которое встречается, хотим мы того или нет, в чрезвычайно разнообразных условиях, как в прикладных (например, в аэродинамике, гидравлике, военно-морском деле и химическом производстве), так и в естественных ситуациях (в гидрофизике, геофизике, особенно в метеорологии, океанографии и в астрофизике) В свете этого не являются неожиданными огромные усилия, уделяемые во всем мире фундаментальным исследованиям турбулентности. Однако с чисто теоретической стороны исследователи столкнулись с исключительными трудностями методов, и возникло понимание того, что проблема турбулентности, всегда считавшаяся трудной, в действительности чрезвычайно трудна. Поэтому расширились временные мерки существенного прогресса в понимании этого явления.

Цели и задачи исследования. Турбулентностью является такое состояние среды, при котором возбуждены движения (турбулентные пульсации) разных масштабов, причем имеет место перекачка энергии между ними. Под масштабом будем понимать порядок величин тех расстояний, на протяжении которых существенно меняется скорость движения. Проблемы перехода к турбулентности важны для практики, для гидро- и аэромеханики, и эти проблемы неоднократно решались в рамках физики, механики и математики многими учеными, но точного описания их нет до сих пор. Проблема возникновения турбулентности и анализа возникающих неустойчивостей важна не только в связи с инженерными приложениями. Большая часть среды, заполняющей Вселенную, находится в турбулентном движении, поэтому с неустойчивостями сталкиваются в физике атмосферы и астрофизике, в океанологии и физике планет.

Исследование каких-либо природных объектов включает организацию, сбор, обработку и анализ наблюдений, обобщение результатов обработки и создание теорий (как качественных, так и количественных) в виде уравнений. Перечисленные этапы исследований объединяются в неразрывный циклический процесс последовательных приближений к более полному изучению исследуемых объектов и процессов. Поэтому автоматизация научных исследований потребовала системного подхода к организации всех этапов научных исследований [1].

Экспериментальное изучение океана, в том числе турбулентных характеристик, связано с проведением дорогостоящих морских экспедиций, и основные затраты материальных средств в океанологии и океанографии относятся к этапу исследований, которые заключаются в проведении измерений, их обработки и теоретическом анализе. В связи с проведением в широком масштабах исследований Мирового океана, возникла проблема обработки массовой океанографической информации [2].

Это выдвинуло перед исследователями новую задачу – оптимизацию исследований, которая заключается в том, чтобы получить необходимые представления о закономерностях процессов в океане при минимальных количествах измерений. Вопрос моделирования структуры деятельного слоя океана в последнее время является особенно актуальным. Это связано с тем, что верхний слой является зоной наиболее активных физических процессов и служит основной сферой жизнедеятельности морских организмов. Моделирование его структуры представляет непосредственный интерес для океанического рыбного промысла, подводного мореплавания, гидроакустики и т.п. одновременное исследование характеристик пограничного слоя океана является одним из важнейших этапов в построении модели циркуляции атмосферы, без чего невозможен прогресс в математических методах прогноза погоды. Численные долгосрочные прогнозы погоды на сегодня находятся в таком состоянии, что их дальнейшее усовершенствование возможно лишь при рассмотрении влияния на атмосферу океана, как мощного инерционного аккумулятора тепла, который активно влияет на погодные условия. Поэтому надежность моделирования процессов в океане, и особенно процессов в его верхнем деятельном слое, приобретает исключительную важность.

Причины и механизмы возникновения турбулентности до сих пор окончательно не выяснены и находятся под пристальным вниманием исследователей этого явления. Выяснение этих моментов требует накопления огромных экспериментальных данных, на базе которых можно было бы проводить необходимые исследования всех возникающих вопросов, связанных с природой возникновения турбулентных неоднородностей. Эти исследования в океанической среде проводятся с помощью специальных аппаратов, которые предназначены для измерений вертикальных распределений температуры, солености и гидрофизического давления. Типичными представителями этих устройств являются СТД-зонды, которые содержат измерительные приспособления для получения данных об электропроводности, температуры и давления в процессе зондирования. Однако существующие зондирующие системы не предназначены для целенаправленного получения данных о мелкомасштабной турбулентности. Возникает задача дополнения к этим системам инструмента, который позволяет выполнять предварительное вычисление характеристик распределения параметров мелкомасштабной турбулентности по глубине, на основании которых возможно определение стратегии зондирования [1].

Решение проблемы. Предлагается использовать математическую модель определения параметров распределения мелкомасштабной турбулентности по глубине для построения стратегии зондирования. Суть этой методики сводится к тому, что для конкретного региона мирового океана, в котором на данный момент необходимо получить информацию о состоянии деятельного слоя, с учетом времени года и времени суток производится моделирование

возможного распределения параметров мелкомасштабных слоев (глубина залегания и толщина прослойки). По этим данным строится стратегия зондирования по глубине с использованием зондирующих устройств, которая подразумевает определение скорости опускания зонда (или частоты опроса измерительных устройств) в конкретных точках по глубине, что позволит получить детальную не избыточную информацию о положении турбулизированных слоев по глубине в данном регионе.

Алгоритм функционирования такой системы представлен на рис.1. В результате работы этого алгоритма должна быть получена таблица, содержащая информацию о стратегии вертикального зондирования, которая определяет способ управления зондом: изменение скорости опускания зонда (только для устройств, связанных с исследовательским судном кабель-гроссом), регулирование частоты опроса измерительных каналов. Стратегия зондирования подразумевает определение скорости зондирования по времени (глубине) или частоты опроса первичных преобразователей в этом интервале. Алгоритм вычисления требуемых параметров зависит от задачи эксперимента: получение данных с заданной разрешающей способностью по глубине или определение минимального объема полезной информации.

Любой гидрофизический эксперимент по вертикальному зондированию требует ввода максимальной глубины опускания зондирующего устройства H_{max} (блок 1). Далее определяются параметры распределения турбулизированных прослоек по глубине (блок 2). Для этого можно использовать математические модели, описанные в работе [3]. Достаточной информацией о залегании таких слоев являются два параметра: глубина залегания слоя (расстояние от поверхности) $H[i]$ и его толщина $dh[i]$.

Двухпараметрические экспоненциальные распределения описывают разнообразие толщин слоев с относительно более высокими скоростями течения:

$$F_1(H) = 1 - \exp[-\gamma * (H - h_0)], \tag{1}$$

где H - расстояние между кластерами и одиночными τ -слоями;

γ и h_0 - параметры распределения.

Функция распределения толщин слоев также имеет вид:

$$F_2(dh) = 1 - \exp(-\alpha * dh), \tag{2}$$

где α - параметр распределения,

dh - толщина τ -слоя.

Параметры α и γ , в свою очередь, являются случайными величинами, условная плотность вероятности которых описывается зависимостью:

$$g_2(\mu / k, \sum_{i=1}^k h_i) = \frac{(\sum_{i=1}^k h_i)^k}{(k-1)!} * \mu^{k-1} * \exp(-\mu * \sum_{i=1}^k h_i), \tag{3}$$

где μ - общее обозначение параметров α, β или γ ;

k - число измерений;

$\sum_{i=1}^k h_i$ - сумма толщин τ -слоев либо расстояний между ними.

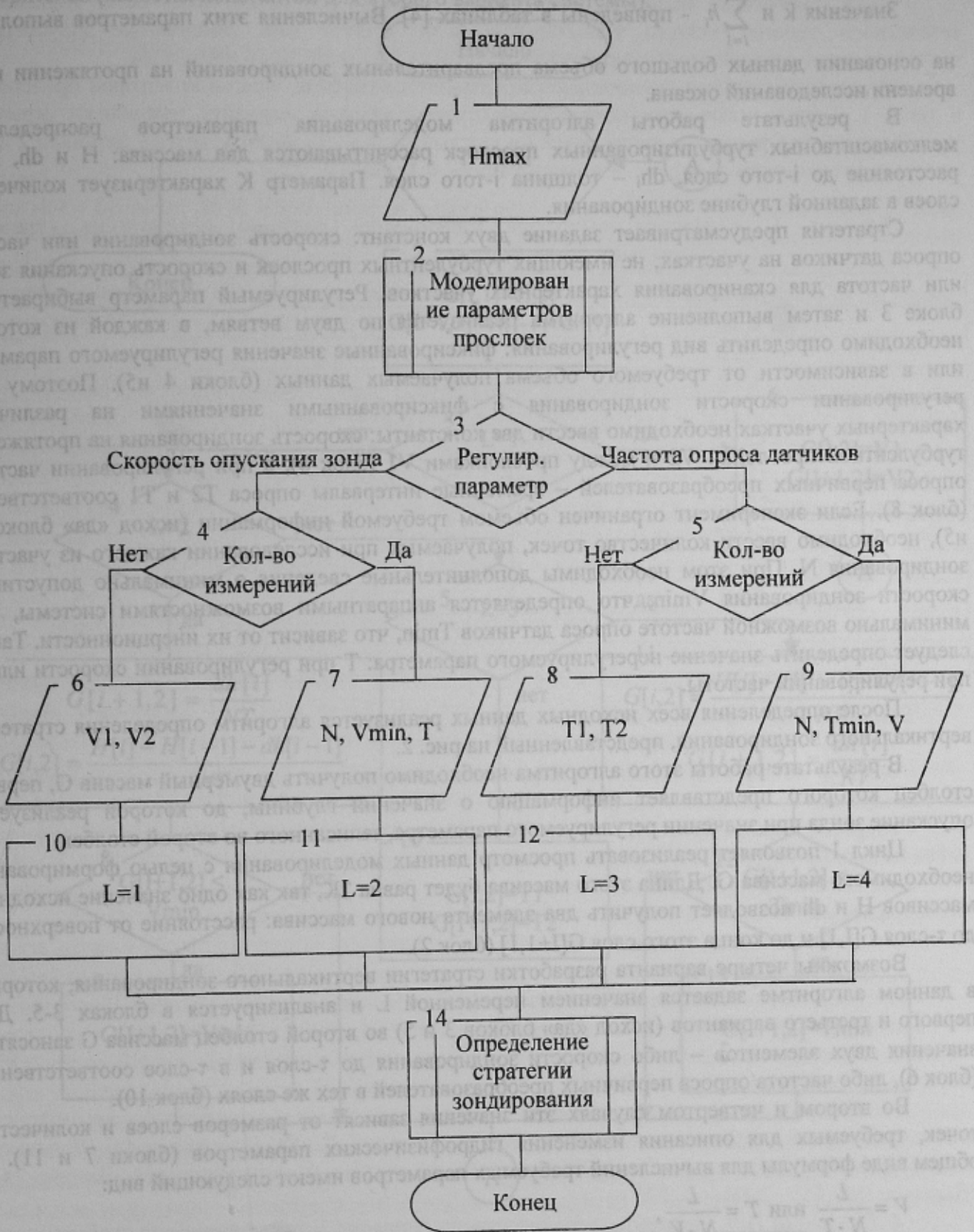


Рис. 1 – Алгоритм функционирования системы определения стратегии вертикального зондирования

Значения k и $\sum_{i=1}^k h_i$ - приведены в таблицах [4]. Вычисления этих параметров выполнены на основании данных большого объема предварительных зондирований на протяжении всего времени исследований океана.

В результате работы алгоритма моделирования параметров распределения мелкомасштабных турбулизованных прослоек рассчитываются два массива: H и dh , H_i – расстояние до i -того слоя, dh_i – толщина i -того слоя. Параметр K характеризует количество слоев в заданной глубине зондирования.

Стратегия предусматривает задание двух констант: скорость зондирования или частота опроса датчиков на участках, не имеющих турбулентных прослоек и скорость опускания зонда или частота для сканирования характерных участков. Регулируемый параметр выбирается в блоке 3 и затем выполнение алгоритма реализуется по двум ветвям, в каждой из которых необходимо определить вид регулирования: фиксированные значения регулируемого параметра или в зависимости от требуемого объема получаемых данных (блоки 4 и 5). Поэтому при регулировании скорости зондирования с фиксированными значениями на различных характерных участках необходимо ввести две константы: скорость зондирования на протяжении турбулентной прослойки V_2 и между прослойками V_1 (блок 6), а при регулировании частоты опроса первичных преобразователей – временные интервалы опроса T_2 и T_1 соответственно (блок 8). Если эксперимент ограничен объемом требуемой информации (исход «да» блоков 4 и 5), необходимо ввести количество точек, получаемых при исследовании каждого из участков зондирования N . При этом необходимы дополнительные сведения о минимально допустимой скорости зондирования V_{min} , что определяется аппаратными возможностями системы, или минимально возможной частоте опроса датчиков T_{min} , что зависит от их инерционности. Также следует определить значение нерегулируемого параметра: T при регулировании скорости или V при регулировании частоты.

После определения всех исходных данных реализуется алгоритм определения стратегии вертикального зондирования, представленный на рис. 2.

В результате работы этого алгоритма необходимо получить двумерный массив G , первый столбец которого представляет информацию о значении глубины, до которой реализуется опускание зонда при значении регулируемого параметра, записанного во второй столбец.

Цикл 1 позволяет реализовать просмотр данных моделирования с целью формирования необходимого массива G . Длина этого массива будет равна $2K$, так как одно значение исходных массивов H и dh позволяет получить два элемента нового массива: расстояние от поверхности до τ -слоя $G[I,1]$ и до конца этого слоя $G[I+1,1]$ (блок 2).

Возможны четыре варианта разработки стратегии вертикального зондирования, который в данном алгоритме задается значением переменной L и анализируется в блоках 3-5. Для первого и третьего вариантов (исход «да» блоков 3 и 5) во второй столбец массива G заносятся значения двух элементов – либо скорости зондирования до τ -слоя и в τ -слое соответственно (блок 6), либо частота опроса первичных преобразователей в тех же слоях (блок 10).

Во втором и четвертом случаях эти значения зависят от размеров слоев и количества точек, требуемых для описания изменения гидрофизических параметров (блоки 7 и 11). В общем виде формулы для вычислений требуемых параметров имеют следующий вид:

$$V = \frac{L}{N \cdot T} \text{ или } T = \frac{L}{N \cdot V},$$

где V – скорость опускания зонда (является константой для четвертого варианта систем); L – ширина слоя; N – количество точек измерений для данного слоя; T – частота опроса

измерителей (является константой для второго варианта системы).

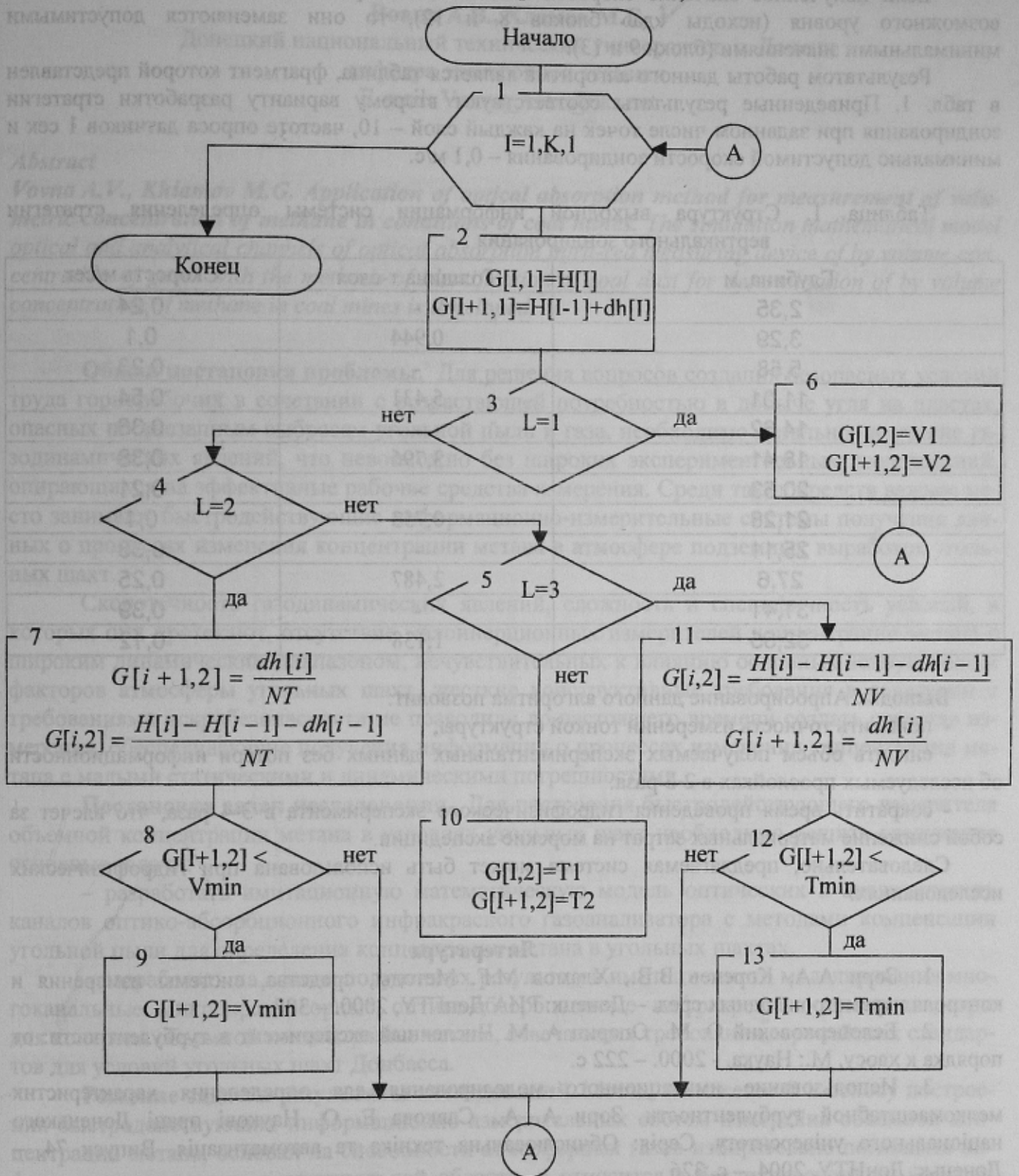


Рис. 2 - Блок-схема определения параметров зондирования

Если полученное значение скорости или частоты опроса датчиков ниже минимально возможного уровня (исходы «да» блоков 8 и 12), то они заменяются допустимыми минимальными значениями (блоки 9 и 13).

Результатом работы данного алгоритма является таблица, фрагмент которой представлен в табл. 1. Приведенные результаты соответствуют второму варианту разработки стратегии зондирования при заданном числе точек на каждый слой – 10, частоте опроса датчиков 1 сек и минимально допустимой скорости зондирования – 0,1 м/с.

Таблица 1. Структура выходной информации системы определения стратегии вертикального зондирования

Глубина, м	Толщина τ -слоя	Скорость м/сек
2,35	-	0,24
3,29	0,944	0,1
5,58	-	0,23
11,01	5,431	0,54
14,62	-	0,36
18,41	3,796	0,38
20,53	-	0,21
21,28	0,753	0,1
25,11	-	0,38
27,6	2,487	0,25
31,41	-	0,39
32,55	1,138	0,12

Выводы. Апробирование данного алгоритма позволит:

- повысить точность измерений тонкой структуры;
- снизить объем получаемых экспериментальных данных без потери информативности об исследуемых прослойках в 2-3 раза;
- сократить время проведения гидрофизического эксперимента в 3-4 раза, что влечет за собой снижение материальных затрат на морские экспедиции.

Следовательно, предлагаемая система может быть использована при гидрофизических исследованиях.

Литература

1. Зори А.А., Корнев В.В., Хламов М.Г. Методы, средства, системы измерения и контроля параметров водных сред. – Донецк: РИА ДонГТУ, 2000. – 388 с.
2. Белоцерковский О. М., Опарин А. М. Численный эксперимент в турбулентности: от порядка к хаосу. М.: Наука. - 2000. – 222 с.
3. Использование имитационного моделирования для определения характеристик мелкомасштабной турбулентности. Зори А. А., Савкова Е. О. Наукові праці Донецького національного університету. Серія: Обчислювальна техніка та автоматизація. Випуск 74. – Донецьк: ДонНТУ, 2004. – с. 326
4. Поздынин В.Д. Элементы вероятностного описания мелкомасштабной турбулентности в океане. Л.: Гидрометеиздат. –1989. – 52 с.