



УДК 550.834.07 (26)

РАСЧЕТ СУММАРНОГО СИГНАЛА ГРУППЫ ПНЕВМАТИЧЕСКИХ ИСТОЧНИКОВ В ДАЛЬНОЙ ЗОНЕ

CALCULATION OF THE TOTAL SIGNAL OF THE GROUP OF PNEUMATIC SOURCES IN THE FAR ZONE

Гуленко Владимир Иванович

доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры
геофизических методов поисков и разведки,
Кубанский государственный университет
v_gul@mail.ru

Захарченко Евгения Ивановна

кандидат технических наук,
заведующая кафедрой
геофизических методов поисков и разведки,
Кубанский государственный университет
evgenia-zax@yandex.ru

Аннотация. В работе рассмотрен алгоритм синтеза сигнала для дальней зоны группы пневматических излучателей по сигналам, зарегистрированным с помощью гидрофонов, установленных в ближней зоне всех излучателей. Моделирование этого алгоритма в среде MathCAD позволило выявить его неустойчивость на первых итерациях вычислительного процесса. Основной физической причиной неустойчивости рассматриваемого алгоритма является то, что сигналы от близко расположенных излучателей трудно разделить: в точке приема они близки по амплитуде, а различие времен их прихода к соседним гидрофонам часто меньше дискретности квантования. В работе показано, что значительно лучшие результаты могут быть получены при установке гидрофонов не у каждого излучателя, а только у каждого кластера группы.

Ключевые слова: сигнал в дальней зоне группы пневмоисточников, сигнал в ближней зоне, гидрофон, итерационный вычислительный процесс.

Gulenko Vladimir Ivanovich

Doctor of Engineering, Professor,
Professor of Department
geophysical methods
of search and investigation,
Kuban State University
v_gul@mail.ru

Zakharchenko Evgenia Ivanovna

Candidate of Technical Sciences,
Manager of Department
geophysical methods
of search and investigation,
Kuban State University
evgenia-zax@yandex.ru

Annotation. The paper considers the algorithm of signal synthesis for the far zone of a group of pneumatic emitters by signals registered with hydrophones installed in the near zone of all emitters. Simulation of this algorithm in MathCAD allowed to reveal its instability at the first iterations of the computational process. The main physical reason for the instability of the algorithm is that the signals from closely spaced emitters are difficult to separate: at the receiving point they are close in amplitude, and the difference in the time of their arrival to neighboring hydrophones is often less than the quantization discreteness. It is shown that much better results can be obtained when installing hydrophones not for each emitter, but only for each cluster of the group.

Keywords: signal in the far field of the group of pneumatic sources, signal in the near field, hydrophone, iterative computational process.

Как известно, для более эффективной обработки данных морской сейсморазведки требуется знать суммарный сигнал группового источника в дальней зоне, т.е. там, где амплитудный спектр сигнала уже не зависит от расстояния, а амплитуда обратно пропорциональна удалению [1, 2 и др.]. Для непосредственной регистрации этого сигнала соображения корректности требуют буксировать измерительный гидрофон в диаметральной плоскости судна на достаточно большой глубине непосредственно под группой [2 и др.]. Однако этот метод может быть использован лишь при достаточно большой глубине моря, что при работах на шельфе далеко не всегда возможно.

Проблема получения суммарного сигнала группы для случаев, когда глубина моря недостаточна для прямых измерений в дальней зоне, может быть решена с помощью метода, предложенного А. Циолковским и др. в работе [1] и позволяющего рассчитать искомый сигнал группы по измерениям сигналов в ближней зоне. В этом случае суммарный сигнал группы в любой точке среды можно представить в виде суперпозиции зарегистрированных в ближней зоне сигналов от отдельных излучателей, измененных взаимным влиянием. По измерениям с помощью гидрофонов в ближней зоне, число которых должно быть равно числу излучателей в группе, можно вычислить эти сигналы из системы алгебраических уравнений.

Рассмотрим этот алгоритм подробнее. Пусть $P_j(t)$ – сигналы, регистрируемые гидрофонами, расположенными в ближней зоне на удалении 1 м от каждого из N излучателей линейной или площадной группы ($j = 1, 2, \dots, N$; где N – количество сигналов, одновременно регистрируемых в ближней



зоне N гидрофонами). При синхронном срабатывании группы сигнал, регистрируемый j -м гидрофоном, имеет вид:

$$P_j(t) = \sum_{i=1}^N \frac{1}{r1_{ij}} f_i \left(t - \frac{r1_{ij} - 1}{c} \right) + \sum_{i=1}^N \frac{k}{r2_{ij}} f_i \left(t - \frac{r2_{ij} - 1}{c} \right), \tag{1}$$

где $f_i(t)$ – реальный сигнал, возбуждаемый i -м излучателем; $r1_{ij}$ – расстояние между i -м действительным излучателем и j -м гидрофоном (при $i = jr1_{ij} = 1$); $r2_{ij}$ – расстояние между i -м мнимым излучателем и j -м гидрофоном, т.е. длина траектория «волны-спутника» от i -го действительного излучателя до j -го гидрофона с отражением от поверхности «вода-воздух» (при $i = jr2_{ij} = 2h - 1$ – если гидрофон расположен над излучателем); k – коэффициент отражения волны давления от поверхности «вода-воздух», $k = -1$, h – глубина буксировки излучателей группы – рисунок 4.

Первая сумма в выражении (1) – суперпозиция прямых волн от всех излучателей группы в точке размещения j -го гидрофона, вторая сумма – суперпозиция «волн-спутников». Это уравнение можно записать в следующем виде:

$$f_j(t) = P_j(t) - \sum_{i=1}^{N(i \neq j)} \frac{1}{r1_{ij}} f_i(t - t1_{i,j}) + \sum_{i=1}^N \frac{1}{r2_{ij}} f_i(t - t2_{ij}), \tag{2}$$

где $t1_{ij} = (r1_{ij} - 1)/c$ и $t2_{ij} = (r2_{ij} - 1)/c$ – соответственно, времена запаздывания прямых и отраженных от поверхности «вода-воздух» волн, распространяющихся со скоростью $c \approx 1500$ м/с, регистрируемых j -м гидрофоном.

Как видно из (2), в точке, где расположен j -й гидрофон, в суммарном регистрируемом сигнале доминирует сигнал от расположенного рядом j -го излучателя. Поэтому при решении системы уравнений (2) итерационным методом в качестве первого приближения можно использовать сигналы $P_j(t)$, зарегистрированные гидрофонами.

С использованием рассчитанных таким образом значений $f_j(t)$ – реальных, искаженных взаимным влиянием сигналов всех излучателей группы суммарный сигнал $F_\Sigma(t)$, излучаемый в вертикальном направлении, с учетом отражения от поверхности «вода-воздух» может быть представлен выражением:

$$F_\Sigma(t) = \sum_{j=1}^N [f_j(t) - f_j(t - \tau)], \tag{3}$$

где $\tau = 2h/c$ – запаздывание «волны-спутника» относительно прямой волны.

На рисунках 1–3 представлены некоторые результаты моделирования, выполненного в среде MathCAD в соответствии с описанным алгоритмом. Расчеты выполнены применительно к площадной группе, содержащей две идентичные линии по 10 пневматических излучателей разного объема, размещенных на базе 15 м и буксируемых на глубине 6 м при разносе между линиями 12 м. Для наглядности в модельной группе не предполагалось гашение пульсаций, поэтому выбор объемов рабочих камер отдельных излучателей осуществлялся достаточно произвольно.

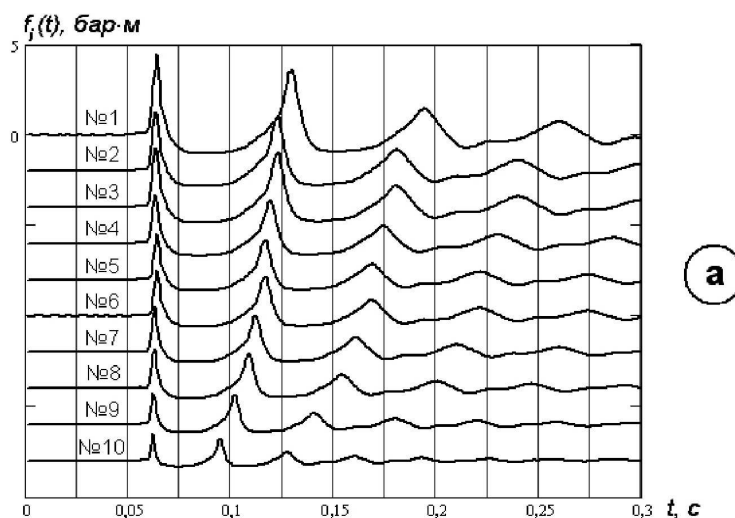
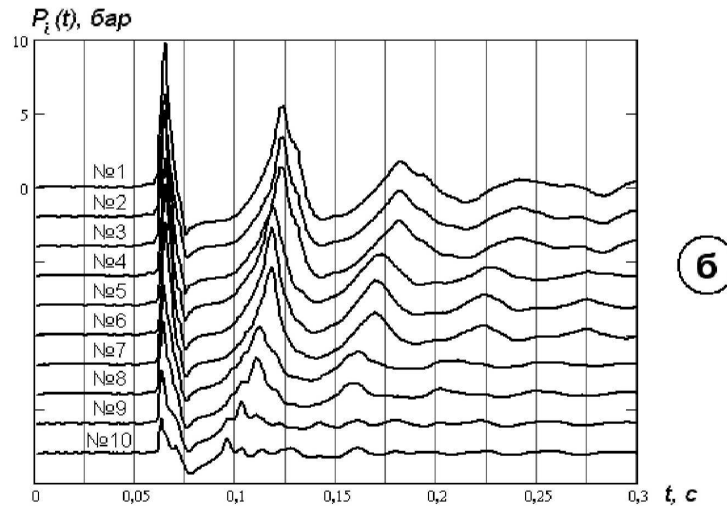


Рисунок 1 – «Реальные» сигналы $f_j(t)$ отдельных излучателей синхронной группы – а, и сигналы $P_j(t)$, зарегистрированные в ближней зоне гидрофонами, расположенными в 1 м над каждым излучателем группы – б



Продолжение рисунка 1 – «Реальные» сигналы $f_i(t)$ отдельных излучателей синхронной группы – а, и сигналы $P_i(t)$, зарегистрированные в ближней зоне гидрофонами, расположенными в 1 м над каждым излучателем группы – б

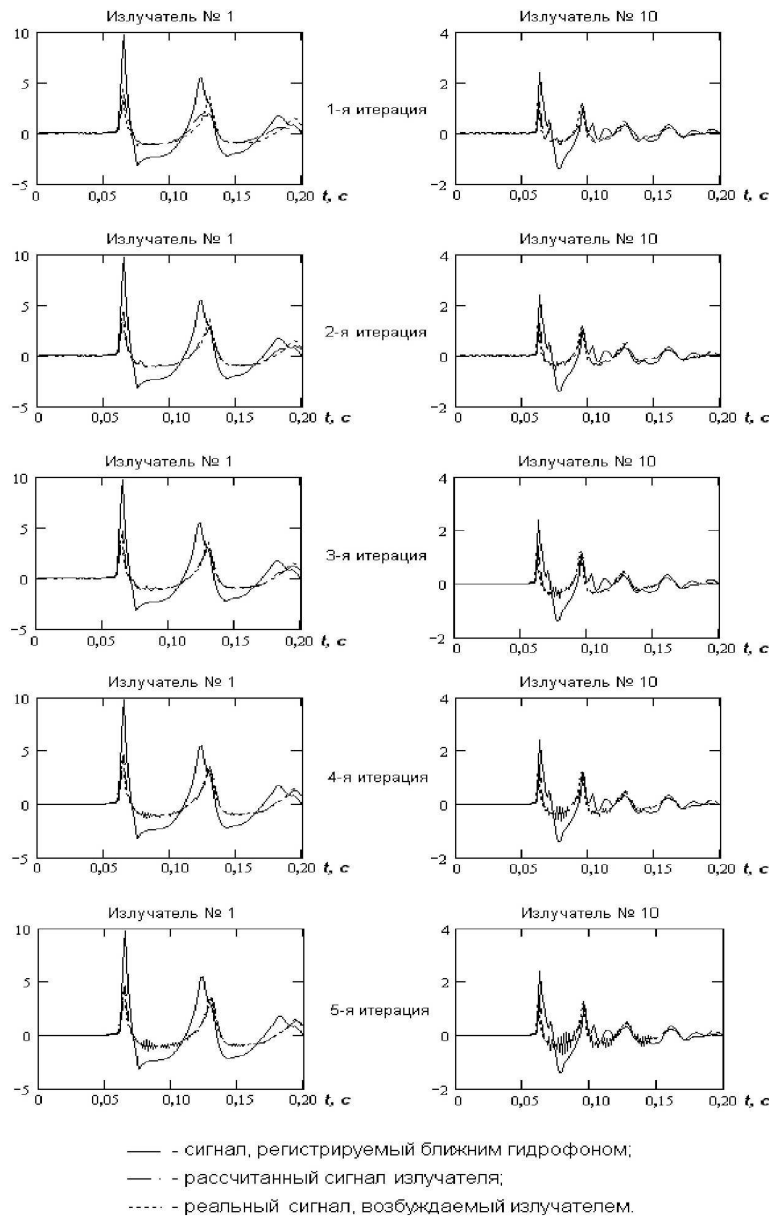


Рисунок 2 – Результаты численного решения системы (2) применительно к излучателям № 1 и № 10 группы (первые пять итераций)

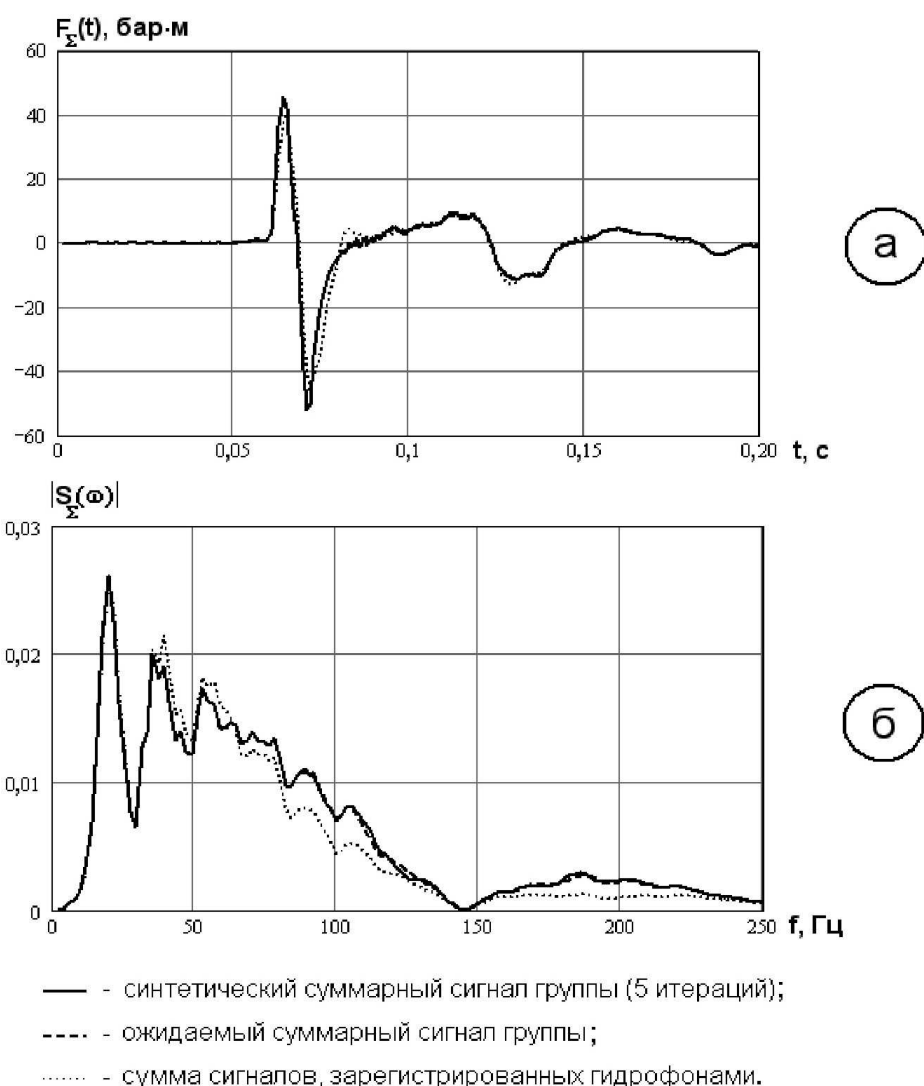


Рисунок 3 – Результаты моделирования: а – расчетные и ожидаемый сигналы группы в дальней зоне; б – их амплитудные спектры

Так, на рисунке 1, а приведены «реальные» сигналы $f_i(t)$ отдельных излучателей синхронной группы, при этом сигналы $P_i(t)$, зарегистрированные в ближней зоне гидрофонами, расположенными в 1 м над соответствующими излучателями группы, приведены на рисунке 1, б.

На рисунке 2 показаны результаты первых пяти итераций, выполненных в ходе численного решения системы (2) применительно к крайним излучателям группы (№ 1 и № 10). Расчетные сигналы, полученные после каждой итерации, показаны на этом рисунке штрих пунктиром, сигналы, регистрируемые ближними гидрофонами $P_1(t)$ и $P_{10}(t)$, а также «реальные» неискаженные сигналы $f_1(t)$ и $f_{10}(t)$, показаны соответственно сплошными и пунктирными линиями.

На рисунке 3,а приведены результаты моделирования: рассчитанный по формуле (3) и ожидаемый суммарные сигналы в дальней зоне $F_{\Sigma}(t)$ (соответственно сплошная и штриховая линии), а также просто сумма сигналов, зарегистрированных гидрофонами ($P_{\Sigma}(t) = k \cdot \sum P_i(t)$, где $k \approx 0,3-0,5$) – пунктирная линия. Амплитудные спектры всех этих сигналов представлены на рисунке 3,б соответствующими линиями.

Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы.

1. Как видно из рисунка 2, расчетные сигналы излучателей уже после трех итераций сравнительно хорошо сходятся к ожидаемым «реальным» сигналам $f_i(t)$. Вместе с тем, как видно из расчетных сигналов, полученных при 4-й и 5-й итерациях, на отрицательных фазах импульсов начинает появляться высокочастотный дребезг, отсутствующий на реальных сигналах и свидетельствующий о некоторой неустойчивости алгоритма. Вычислительные эксперименты, выполненные при изменении взаимного расположения гидрофонов и излучателей или при некотором небольшом увеличении дистанции между ними (например, до 1,5 м), показывают, что этот алгоритм становится неустойчивым уже на первых итерациях и не позволяет достичь приемлемого результата.



2. Как показывают результаты моделирования, *основной физической причиной неустойчивости рассматриваемого алгоритма является то, что сигналы от близко расположенных излучателей трудно разделимы: в точке приема они близки по амплитуде, а различие времен их прихода к соседним гидрофонам часто меньше дискретности квантования.* Однако, как показали выполненные расчеты, *значительно лучшие результаты могут быть получены при установке гидрофонов не у каждого излучателя, а только у каждого кластера* (рис. 4,б).

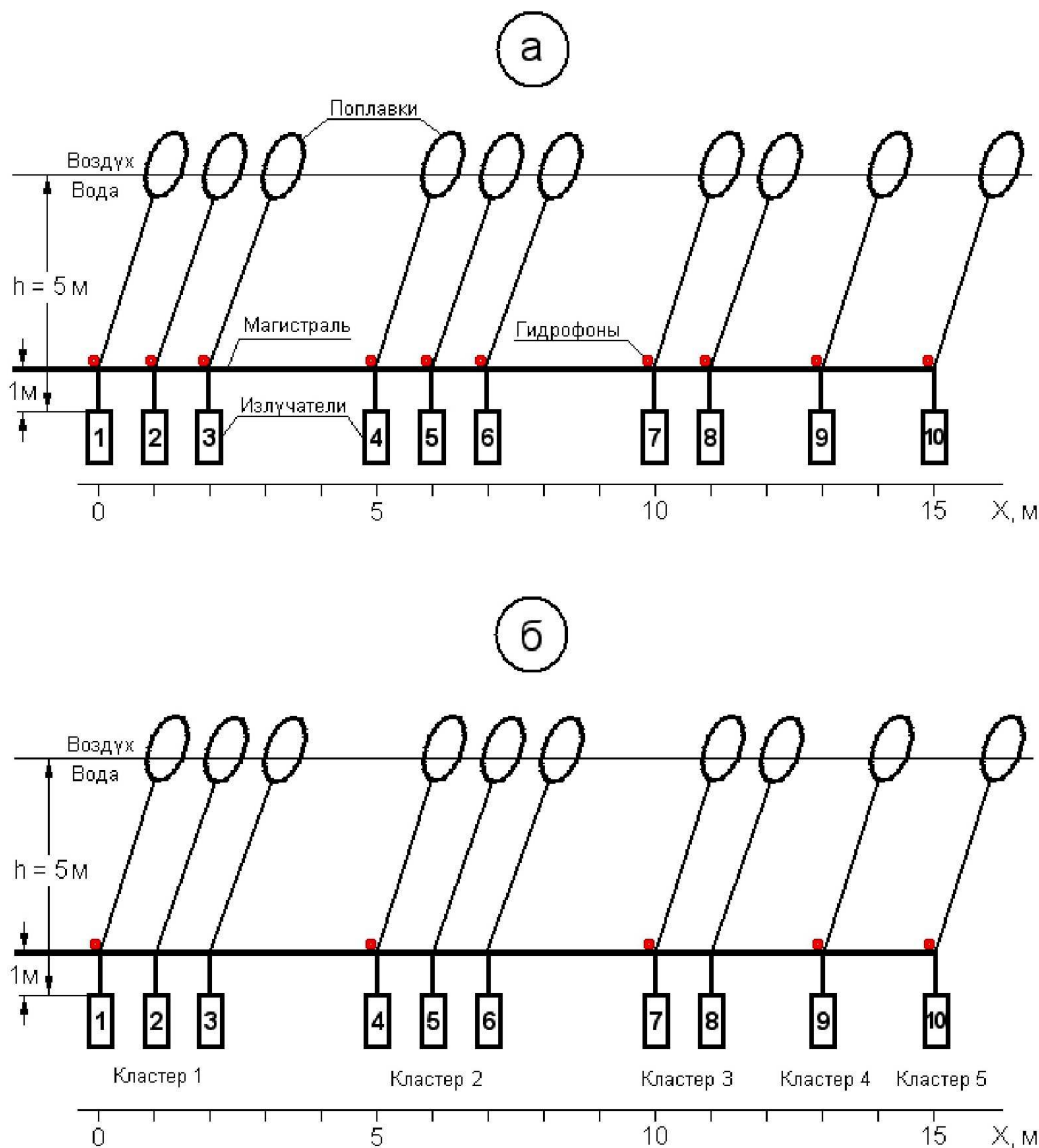


Рисунок 4 – Геометрия модельной группы и варианты размещения в ближней зоне гидрофонов: а – в 1 м над каждым излучателем; б – над каждым кластером группы

При этом наряду с существенным уменьшением количества измерительных гидрофонов (в рассматриваемом примере вдвое) задача разделения сигналов близко расположенных излучателей уже не возникает, так как в рассматриваемом алгоритме восстанавливаются не сигналы отдельных излучателей, а сигналы отдельных кластеров (подгрупп) – рисунок 5. Качество восстановления суммарного сигнала группы в этом случае хотя и несколько хуже (рис. 6), однако устойчивость алгоритма (при вдвое меньшем объеме регистрируемой и обрабатываемой информации) значительно выше.

3. Из сравнения сигналов, приведенных на рисунке 1,а и б видно, что хотя в суммарном сигнале, регистрируемом j -м гидрофоном, и доминирует прямой сигнал от расположенного рядом j -го излучателя, однако влияние соседних излучателей также велико и может существенно менять форму сигнала. Тем не менее, как следует из сопоставления сигналов и спектров на рисунках 3 и 6, в качестве первого и достаточно хорошего приближения к сигналу группы в дальней зоне в ряде случаев *может быть использована простая сумма зарегистрированных гидрофонами сигналов $P(t)$, пересчитанная на дальнюю зону в соответствии с выражением (3).*

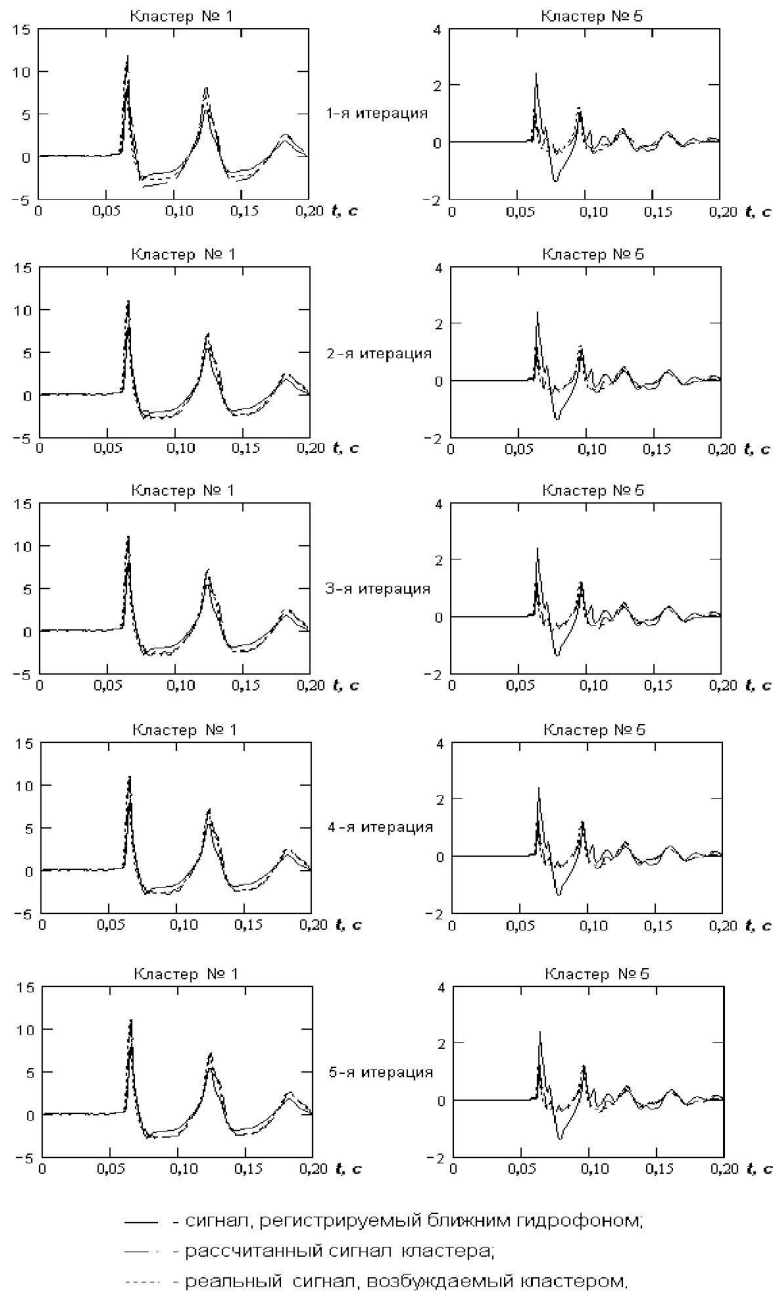


Рисунок 5 – Результаты численного решения системы (2) применительно к кластерам № 1 (излучатели № 1 + № 2 + № 3) и № 5 (излучатель № 10) группы (первые 5 итераций)

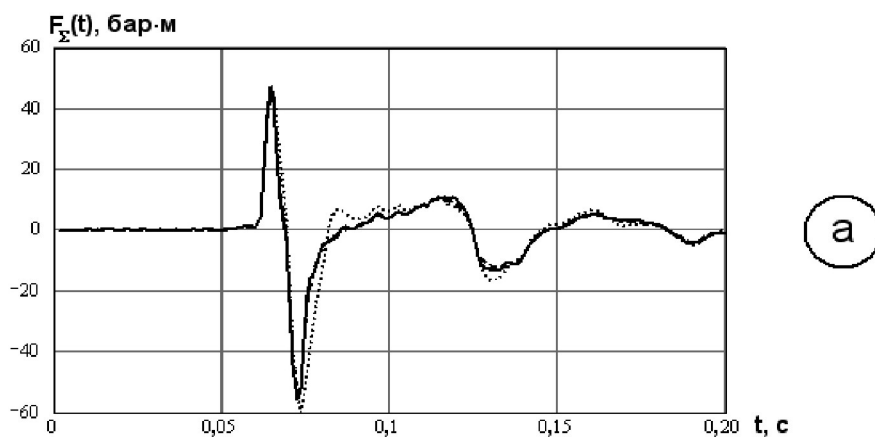
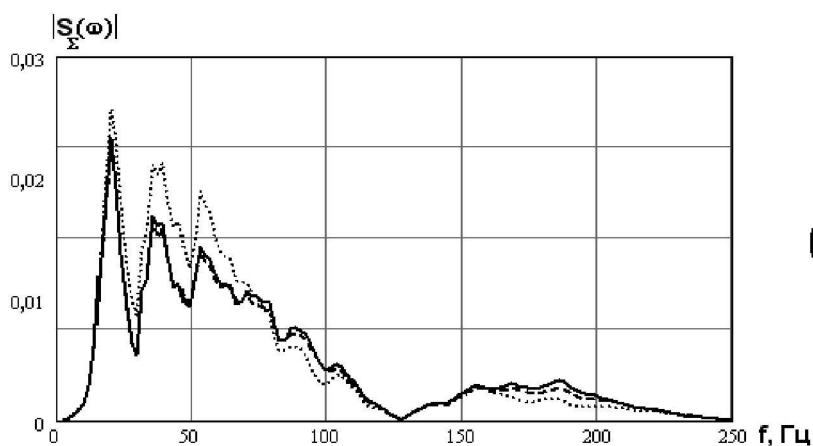


Рисунок 6 – Результаты моделирования при установке гидрофонов по одному на каждый кластер: а – расчетные и ожидаемый сигналы группы в дальней зоне; б – их амплитудные спектры



- - синтетический суммарный сигнал группы (5 итераций);
- - - - - ожидаемый суммарный сигнал группы;
- - сумма сигналов, зарегистрированных гидрофонами.

Продолжение рисунка 6 – Результаты моделирования при установке гидрофонов по одному на каждый кластер:
 а – расчетные и ожидаемый сигналы группы в дальней зоне; б – их амплитудные спектры

Литература:

1. Ziolkowsky A., Parkes G., Hatton L., Haughland T. The signature of an air gun array: computation from near-field measurements including interactions // *Geophysics*. – Vol. 47. – № 10. – P. 1413–1421.
2. Гуленко В.И. Пневматические источники упругих волн для морской сейсморазведки : монография. – Краснодар : КубГУ, 2003. – 313 с.

References:

1. Ziolkowsky A., Parkes G., Hatton L., Haughland T. The signature of an air gun array: computation from near-field measurements including interactions // *Geophysics*. – V. 47. – № 10. – P. 1413–1421.
2. Gulenko V.I. Pneumatic sources of elastic waves for marine seismic exploration : monograph. – Krasnodar : Kuban State University, 2003. – 313 p.