

Принципы построения групповых пневматических источников для морской сейсморазведки

- Гуленко В.И., ФГБОУ ВПО «Кубанский государственный университет», г. Краснодар, Рудаков А.В., ФГУП ГНЦ «Южморгеология», г. Геленджик, Самсонов Е.А., ЗАО «РОМОНА», г. Южно-Сахалинск

Повышение геологической эффективности морской сейсморазведки предполагает постоянное совершенствование всего технологического комплекса, применяемого на акваториях. При этом наряду с использованием современных геофизических судов, спутниковых систем позиционирования и цифровых сейсморегистрирующих телеметрических систем, необходимо применение и достаточно мощных источников, возбуждающих высокоамплитудные и широкополосные сигналы, не осложненные пульсациями, обеспечивающие решение сложных геологических задач в различных сейсмогеологических условиях.

Достижение этой цели обычно осуществляется применением сложных линейных или площадных неоднородных пневматических групп, содержащих в своем составе иногда десятки пневматических излучателей, объединенных в ряд тесных подгрупп – кластеров [1, 9, 11].

При создании таких источников, помимо решения целого ряда чисто технических проблем, связанных с размещением их на борту судна и безопасной эксплуатацией, одной из наиболее сложных задач является определение исходных требований к выбору основных параметров группы, таких, как объемы рабочих камер излучателей и геометрия их группирования, а также других факторов, определяющих амплитудные, временные и частотные характеристики излучаемых акустических сигналов [1, 9, 11].

В настоящей работе рассмотрены некоторые принципы построения линейных и площадных групп пневматических источников для морской сейсморазведки.

Так же, как и при наземной сейсморазведке, при морской сейсморазведке выбор характеристик источника полностью определяется геологической задачей, для решения которой создается бортовой сейсморазведочный аппаратный комплекс, а также технологическими особенностями проведения сейсморазведочных работ в разных сейсмогеологических условиях и возможностях применяемых транспортных средств.

Так, для решения геологических задач по поиску и разведке глубоко залегающих месторождений углеводородов в шельфовой зоне с глубинами моря свыше 1020 м чаще всего применяются сравнительно большие научно-исследовательские геофизические суда водоизмещением в несколько тысяч тонн, оснащенные мощным компрессорным и специализированным такелажным оборудованием, необходимыми для эксплуатации больших площадных пневматических групп, состоящих из нескольких (от 4 до 8) идентичных линейных подгрупп с суммарным объемом рабочих камер от 40–50 дм³ до 100 дм³ (а иногда и больше).

В последнее десятилетие для морской сейсморазведки по технологии 3D применяются научно-исследовательские суда третьего поколения – так называемые «рамформы», оснащенные наиболее совершенным сейсморазведочным аппаратным комплексом, позволяющим обеспечить одновременную регистрацию сейсмической информации с нескольких тысяч каналов, размещенных в нескольких десятках одновременно буксируемых кос. В качестве источников при этом используются наиболее мощ-

ные площадные группы, состоящие из 68 одновременно буксируемых линий с общим количеством пневматических излучателей, достигающим сотни.

При скорости буксировки 4–6 узлов, обычной при работах с плавающими пьезокосами, интервал между пунктами возбуждения в 25 м такое судно проходит за время, равное 8–12 с. Производительность компрессорной станции должна обеспечивать гарантированное заполнение за это время всех рабочих камер излучателей группы сжатым воздухом при рабочем давлении 12–15 МПа, при этом вся энергия сжатого воздуха, запаасаемая на одно воздействие, может составлять несколько (2–4) мегаджоулей.

Таким образом, общий суммарный объем группы, с одной стороны, определяется производительностью судовой компрессорной станции, а с другой — необходимостью обеспечить такую плотность потока акустической энергии в заданной полосе частот и в заданных телесных углах, которая обеспечит требуемое для успешного решения геологической задачи отношение «сигнал/помеха» на входе буксируемого приемного устройства, т.е. необходимую помехоустойчивость группы.

При детальной сейсморазведке ограниченных по площади объектов, залегающих на средних глубинах, при профильных работах по технологии 2D, чаще используются специализированные геофизические суда второго поколения с водоизмещением до полутора тысяч тонн, имеющие значительно меньшую энерговооруженность и допускающие одновременное использование от 2-х до 4-х линейных подгрупп с общим количеством излучателей до 20–30, при суммарном объеме камер до 30–40 дм³.

До конца 1980-х годов на геофизических судах такого класса нередко применялись компактные пневматические группы с размещением группированных

излучателей на буксируемых металлических рамах. В отличие от линейных и тем более площадных источников компактные группы имеют значительно более высокий уровень взаимного акустического влияния, обладают слабо выраженными свойствами направленности и при одинаковом суммарном объеме обычно уступают линейным группам по всем акустическим показателям [1, 4].

Для решения инженерно-геологических задач при исследованиях неглубоко залегающих толщ и верхней части разреза обычно применяются сравнительно небольшие геофизические суда водоизмещением до 600–800 т. В составе технологического комплекса, отработанного в последние годы в ГНЦ ФГУП «Южморгеология», в ЗАО «РОМОНА» и др. [7], наряду с обычно применяемыми для решения подобных задач сейсмоакустикой, гидролокацией бокового обзора и другими методами, нередко применяют и высокоразрешающую высокочастотную сейсморазведку с регистрацией в полосе частот от 20–30 Гц до 300–400 Гц. При этом лучшие результаты были получены при использовании в качестве источников возбуждения сравнительно небольших компактных пневматических групп, содержащих 3–5 излучателей (1–2 кластера) с общим объемом до 2–3 дм³, и буксируемых на глубине 2–3 м [7].

При сейсморазведке в условиях мелководья, если глубина моря составляет от 2 м до 8–10 м, обычно применяются сравнительно мелкосидящие малотоннажные суда, энерговооруженность и грузоподъемность которых позволяют эксплуатировать лишь весьма небольшие пневматические группы (8–16 излучателей) с суммарным объемом 10–20 дм³ [1, 4]. В подобных сейсмогеологических условиях до недавнего времени часто применялась, так называемая,

«старт-стопная» технология (в зарубежной терминологии «yo-yo») с периодическими размотками-выборками косы при непрерывном движении судна. В последнее десятилетие с появлением современных цифровых телеметрических систем, таких, как «BOX», «ARAM ARIES» и других, получили распространение пространственные системы наблюдения с неподвижными донными приемными устройствами и подвижным взрыв-пунктом [6], при этом «старт-стопная» технология больше не применяется.

Хорошие показатели в таких условиях имеют геофизические суда-катамараны, например, типа «Искатель» – рис.1, которые при малой осадке (около 1,5 м) обеспечивают эксплуатацию более мощных излучающих систем, содержащих до 4-х линейных подгрупп с общим количеством излучателей до 30–40, при суммарном объеме камер до 40–50 дм³ [8].

В наиболее сложных сейсмогеологических условиях предельного мелководья и в транзитной зоне наряду с обычным линейным 2D-профилированием с перемещаемой расстановкой (технология «Drag Bottom» с донной косой) в последние годы также широко применяются пространственные системы наблюдения с неподвижным приемным устройством (донная телеметрия, донная коса, или установленные на металлических штырях геофоны) и

подвижным взрыв-пунктом, перемещающимся по заданной сети точек возбуждения [4]. В качестве источников применяются обычно сравнительно небольшие группы пневматических излучателей, устанавливаемые на маломерном плавсредстве (понтон, баржа и т.п.) и буксируемые на поплавках с подвеской на глубине 1,0–1,5 м, или волоком по дну (при глубине моря менее 1,0 м). В последнем случае применяется накопление информации.

В транзитной зоне, при глубине моря менее 0,51,0 м, где возбуждение в водном слое становится неэффективным, лучшие результаты достигаются с использованием пневматических источников погружного типа, возбуждающих сигналы в мелких скважинах и обычно работающих в режиме накопления. При этом весь аппаратный комплекс, включая сейсмостанцию, компрессор и шнековую буровую установку или гидромонитор, размещают на транспортных средствах амфибийного класса, имеющих повышенную проходимость – рис.2.

Таким образом, учитывая большое разнообразие решаемых геологических задач, применяемых технологий, а также различие в энерговооруженности и грузоподъемности транспортных средств, используемых в разных сейсмогеологических условиях, наиболее целесообразным представляется создание технических средств для возбуждения

► Рис. 1. Мелководный катамаран НИС «Искатель-5» [8]





◀ Рис. 2. Взрыв-пункт с буровой шнековой установкой и погружным пневматическим источником ПИК-3 на базе плавающего гусеничного транспорта. Работы ГНЦ ФГУП «Южморгеология» на Северном Каспии [4].

упругих волн на основе модульного принципа построения аппаратуры. В свое время такой подход был обоснован А.В. Калининым применительно к разработке электроискрового источника для морских сейсмоакустических исследований. Применительно к разработке групповых пневматических источников модульный принцип построения аппаратуры предполагает создание такого комплекса технических средств, который при минимальном номенклатурном разнообразии применяемых устройств обеспечил бы максимальное разнообразие характеристик, необходимое для решения широкого спектра задач в различных сейсмогеологических условиях.

При блочном исполнении компрессорной станции и системы управления такая задача сводится, в сущности, к созданию на основе ряда однотипных излучателей («Bolt», «Sleeve Gun», «G.Gun», «Пульс», «Малыш» или других) нескольких универсальных линейных подгрупп с разными суммарными объемами, имеющих высокую надежность и хорошие акустические показатели.

Объемы камер излучателей в линейной подгруппе, их количество, база группирования и глубина погружения при этом выбираются таким образом, чтобы при одновременном срабатыва-

нии группы первые пики давления сигналов отдельных излучателей суммировались синфазно, в то время как повторные удары (с учётом отражения от поверхности «водавоздух») складывались в противофазе.

В монографии [1] рассмотрены разные методы синтеза синхронных неоднородных пневматических групп, предполагающие получение суммарного сигнала с гашением пульсаций. Один из наиболее простых методов состоит в следующем.

Линейная подгруппа создается из нескольких кластеров, расстояния между которыми выбираются такими, чтобы их взаимное акустическое влияние отсутствовало или было минимальным. При этом расстояние между соседними излучателями в каждом кластере выбирается так, чтобы их воздушные пузыри при выхлопе сливались в единый объем. Период пульсации сигнала, излучаемого кластером, примерно такой же, как и одиночного излучателя суммарного объема, однако амплитудные характеристики значительно лучше: амплитуда первого пика суммарного сигнала кластера существенно выше и почти равна сумме амплитуд сигналов отдельных излучателей. Амплитуда второго пика (т.е. пульсации) при этом значительно ниже, чем у одиночного излучателя суммарного объема.

Объемы рабочих камер излучателей (кластеров) V_i выбираются таким образом, чтобы все пульсации (вторые пики) не складывались синфазно, а образовывали последовательность импульсов с приблизительно постоянной разностью периодов пульсаций на величину ΔT – рис.3 (б). Значение ΔT при этом выбирается так, чтобы отражение повторного пика $(i-1)$ -го сигнала от поверхности «вода-воздух» совпадало по времени с повторным пиком i -го сигнала и обеспечивало его гашение. При этом значение ΔT должно быть равно времени пробега волны от излучателя до поверхности «вода-воздух» и обратно: $\Delta T = 2h/c$, где h – глубина погружения излучателя, c – скорость распространения упругих волн в воде $c = 1500 \text{ м/с}$.

В соответствии с известной формулой Релея-Виллиса [1–3, 9–10] при фиксированном рабочем давлении сжатого воздуха и одинаковой глубине погружения излучателей периоды пульсации сигналов T_i и объемы рабочих камер V_i связаны соотношением:

$$T_i = k V_i^{1/3}, \quad (1)$$

где k – коэффициент, зависящий от конструкции излучателя; при этом

$$T_{i+1} = T_i + \Delta T. \quad (2)$$

Подставив в (2) выражение (1) для периода пульсации T_i , после небольших преобразований получим рекуррентную формулу для расчета объемов рабочих камер пневматических излучателей (кластеров) в линейной подгруппе:

$$V_i = V_1 [1 + 2h(i-1)/(cT_1)]^3, \quad i = 2, \dots, n \quad (3)$$

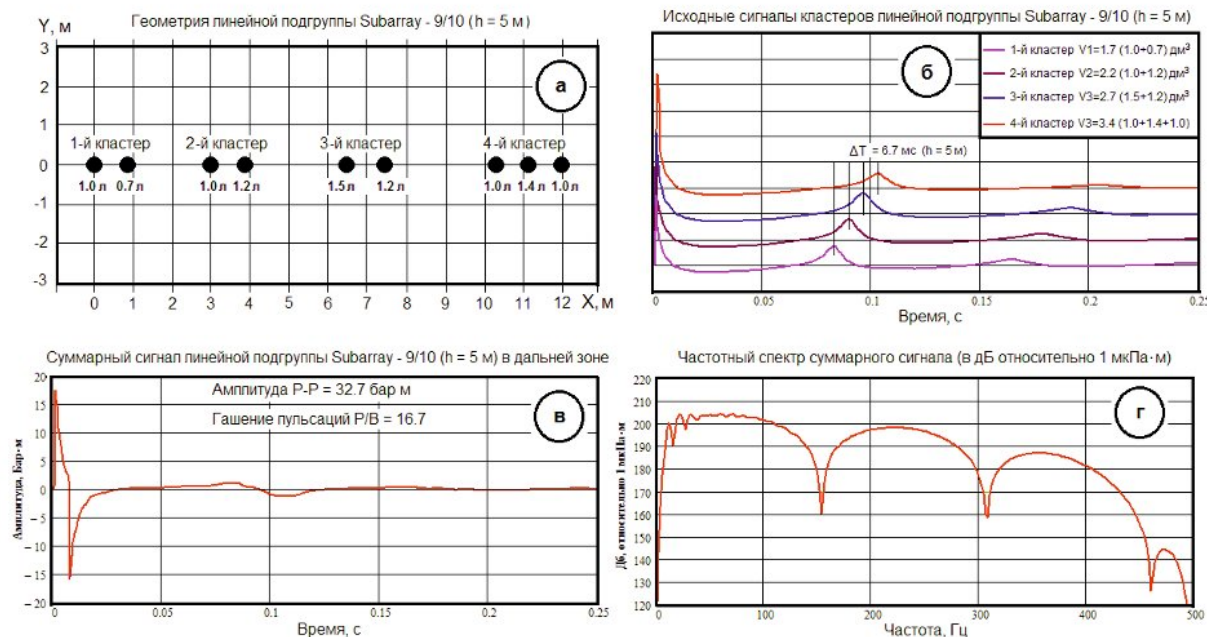
где V_1 и T_1 – объем рабочей камеры и период пульсации сигнала 1-го излучателя линейной подгруппы, имеющего минимальный объем, n – количество кластеров в линии. Окончательная настройка конфигурации может быть выполнена после экспериментального исследования акустических характеристик группы.

В качестве примера на рис.3 приведены результаты расчета конфигурации линейной подгруппы из 4-х кластеров (9 излучателей) с суммарным объемом 10 дм^3 , расположенных на базе 12 м. Расчет сигналов кластеров, суммарного сигнала линейной группы и его амплитудного спектра выполнен в среде MathCAD на основе алгоритмов, аналогичных реализованным в известном пакете «Gundalf™» [10].

Использование пневматических групп с большим суммарным объемом возможно лишь на специализированных геофизических судах, оснащенных как сложным такелажным оборудованием, необходимым для спускоподъемных операций и для буксировки больших пневматических групп, так и более совершенным и мощным компрессорным оборудованием и соответствующими системами контроля и управления.

Тем не менее, использование больших неоднородных групп оправдано, так как наряду с формированием простых по форме и коротких по длительности сигналов с широкополосным спектром, позволяет также значительно увеличить амплитуду и энергию излучения и тем самым существенно повысить помехоустойчивость и глубинность морских сейсмических исследований.

Другим важным обстоятельством является и то, что большие группы, как правило, располагаются на базе, размеры которой соизмеримы с длиной волны, что позволяет использовать такие группы и в качестве направленных интерференционных систем. При синхронном срабатывании такие линейные или площадные группы имеют характеристику направленности с максимумом в вертикальном направлении. Вводя временные задержки в моменты срабатывания соседних излучателей или соседних подгрупп, можно реализовать интерференционную систему с регулируемой



► **Рис. 3. Результаты расчета конфигурации линейной подгруппы Subarray ($N = 9$, $V_x = 10 \text{ дм}^3$, $h = 5 \text{ м}$): (а) – геометрия подгруппы; (б) – сигналы отдельных кластеров в ближней зоне; (в) – суммарный сигнал линейной подгруппы в дальней зоне; (г) – модуль частотного спектра этого сигнала.**

характеристикой направленности, которая на стадии возбуждения обеспечит формирование волн с заданными кажущимися скоростями.

Такая интерференционная система может быть создана простым объединением идентичных линейных подгрупп в соответствующую площадную систему. За счет такого объединения амплитуда суммарного сигнала в направлении акустической оси группы α_0 возрастает приблизительно пропорционально количеству объединяемых подгрупп K , а плотность потока акустической энергии – пропорционально K^2 . Наряду с изменением амплитудных и энергетических показателей при этом происходит существенное изменение и свойств направленности группы.

В качестве примера на рис. 4, а и б приведены модули обобщенных интерференционных характеристик, соответственно, в продольной (ХОЗ) и поперечной (YOZ) плоскостях линейной подгруппы Subarray-9/10 при глубине погружения $h = 5 \text{ м}$, рассчитанные при $\alpha_0 = 0^\circ$

(синхронное срабатывание). Конфигурация линейной группы Subarray-9/10 приведена на рис.3 (а).

Как видно из рис. 3 (в) одна такая линейная подгруппа имеет неплохие акустические показатели: расчетная амплитуда сигнала Р-Р составляет 32.7 бар·м, степень гашения пульсаций Р/В – 16.7, однако, как следует из рис.4, при базе группирования $D = 12 \text{ м}$ характеризуется сравнительно невысокой направленностью даже в продольной плоскости ХОЗ ($\beta = 0$). В поперечной плоскости YOZ ($\beta = 90$) направленность любой одной линейной группы соответствует направленности точечного источника.

Для сжатия характеристики направленности группы в плоскости YOZ применяется поперечное группирование линий, т.е. объединение их в одну площадную группу. Так, на рис. 4, в и г приведены обобщенные характеристики в плоскости YOZ двух площадных групп, состоящих, соответственно, из двух и четырех идентичных линейных подгрупп (Subarray-9/10, $h = 5 \text{ м}$), буксирюемых

параллельно с разномом между линиями $\Delta Y = 6,0$ м. Из сопоставления рис. 4, б, в и г видно, что при этом происходит весьма эффективное поперечное сжатие характеристики направленности площадной группы. Однако в продольной плоскости XOZ характеристики направленности всех этих вариантов групп по-прежнему имеют вид, представленный на рис. 4 (а).

Совершенно очевидно, что в продольной плоскости XOZ дальнейшее сжатие основного лепестка характеристики также может быть достигнуто увеличением продольной базы группирования D. Однако, учитывая то, что длина каждой линии конструктивно является фиксированной и определяется длиной эстакады на палубе судна, на которой размещаются все линейные подгруппы в транспортном положении, увеличение продольной базы группы чаще всего может осуществляться только за счет продоль-

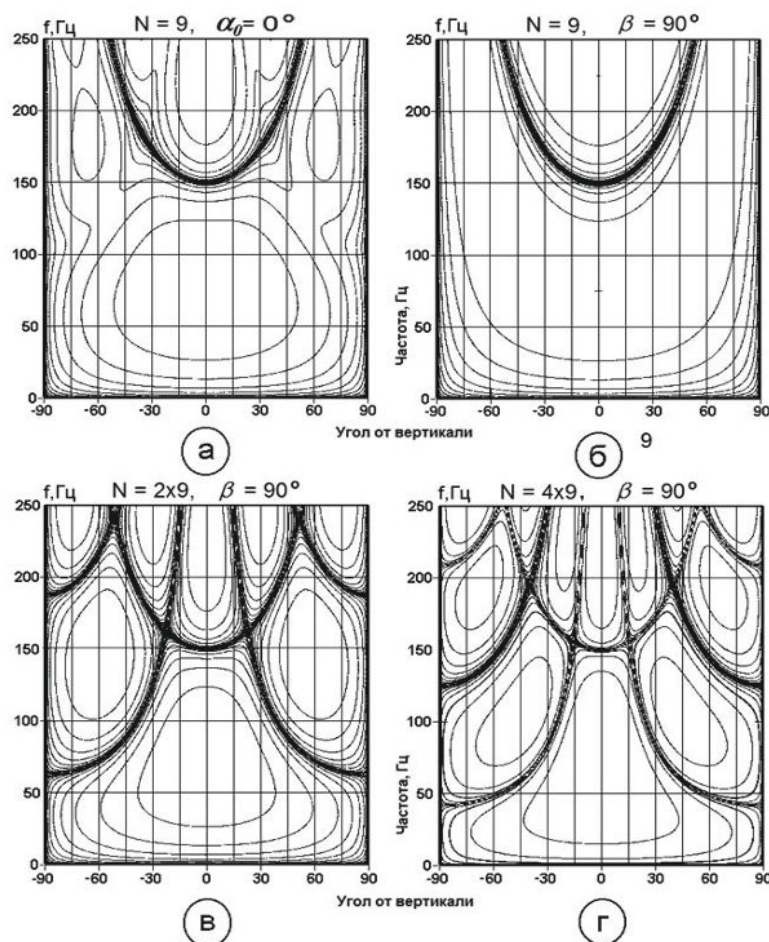
ного разнosa X между подгруппами.

В качестве такого примера на рис. 5 показана серия характеристик и диаграмм направленности в плоскости XOZ, рассчитанных для одной (а), двух (б) и четырех подгрупп (в) Subarray-9/10, при глубине погружения $h = 5$ м, $\alpha_0 = 0^\circ$ и величине продольного разнosa между подгруппами $\Delta X = 15$ м.

Из представленных на рис. 5 характеристик видно, что основной лепесток диаграмм направленности, сформированный в вертикальном направлении, с увеличением разнosa ΔX заметно сужается.

Таким образом, выбирая соответствующие продольные и поперечные разнosa между подгруппами ΔX и ΔY , а также задавая для каждой подгруппы с помощью задержек $\{\Delta t\}$ определенный закон срабатывания излучателей, можно достаточно эффективно концентриро-

► Рис. 4. Модули обобщенных характеристик линейной пневматической группы при $h = 5$ м: а - характеристика в плоскости XOZ, одна линия Subarray-9/10; б - характеристика в плоскости YOZ, одна линия; в - характеристика в плоскости YOZ, две линии Subarray-9/10 параллельно с поперечным разномом $\Delta Y = 6$ м; г - характеристика в плоскости YOZ, четыре линии параллельно с поперечным разномом между линиями $\Delta Y = 6$ м



вать излучаемую энергию в любом направлении нижнего полупространства в пределах любого заданного телесного угла.

Вместе с тем практика показывает, что сжатие характеристики направленности группы в продольной плоскости XOZ должно быть ограничено определенными пределами. Так, для последующей обработки информации по алгоритмам ОГТ желательно, чтобы целевые отражения на сейсмограммах были выдержаны по форме и амплитуде по всей длине годографа. Это позволяет получить максимальный эффект при последующем суммировании трасс.

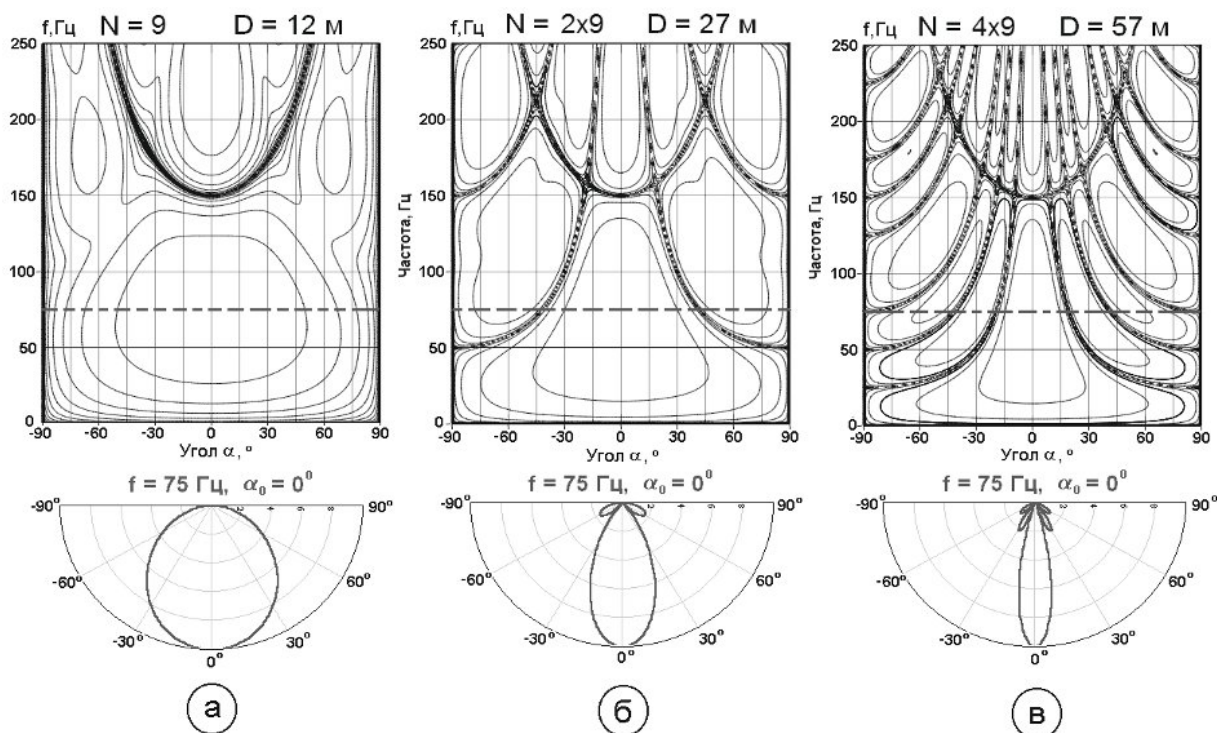
Как следует из рис. 6, для этого необходимо, чтобы при группировании излучателей основной лепесток характеристики направленности был сформирован в направлении α_0 , а ширина этого лепестка по уровню 0,707 определялась углами α_{min} и α_{max} соответствующими выходу

сейсмических лучей на концевые точки X_{min} и X_{max} флангового приемного устройства.

В зависимости от длины приемного устройства L и глубины отражающей границы H , значения α_0 , α_{min} и α_{max} в первом приближении могут быть представлены следующими очевидными выражениями:

$$\alpha_{min} = \arctg\left(\frac{X_{min}}{2H}\right); \quad \alpha_0 = \arctg\left(\frac{X_{cp}}{2H}\right); \\ \alpha_{max} = \arctg\left(\frac{X_{max}}{2H}\right). \quad (4)$$

На рис. 7 приведены зависимости $\alpha_0(H)$, $\alpha_{min}(H)$ и $\alpha_{max}(H)$, рассчитанные для приемных устройств разной длины и позволяющие приблизительно оценить необходимую ширину основного лепестка характеристики направленности пневматической группы в продольной плоскости XOZ.



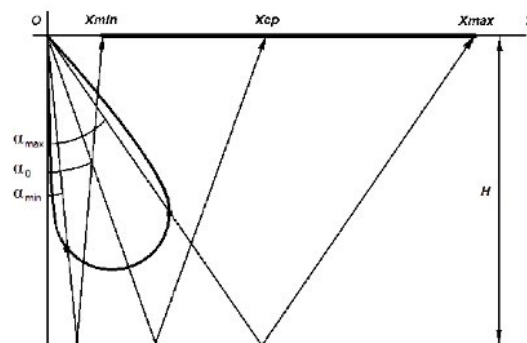
▲ Рис. 5. Модули обобщенных характеристик в плоскости XOZ и диаграммы направленности на частоте $f_0 = 75$ Гц линейной пневматической группы при $h = 5$ м: а - одна линия Subarray-9/10, $N = 9$; б - две линии Subarray-9/10 ($N = 18$), с продольным разнесом $\Delta X = 15$ м; в - четыре линии Subarray-9/10 ($N = 36$), с продольным разнесом $\Delta X = 15$ м. D - общая база группы. Угол настройки всех диаграмм $\alpha_0 = 0^\circ$ (синхронное срабатывание излучателей)

Более точно, с учетом скоростей упругих волн в среде и сложных траекторий лучей, значения α_0 , α_{min} и α_{max} могут быть определены, например, с помощью пакета программ «ВОЛНА-М» для моделирования сейсмических волновых полей, специально разработанного для корректного решения подобных задач [5]. Как видно из результатов моделирования лучевых диаграмм, интервал углов $\alpha_{min} - \alpha_{max}$, ограничивающих пределы лучевой трубки в продольной плоскости XOZ, выходящей на приемную расстановку, может существенно зависеть от скоростной дифференциации разреза – рис.8. Из сопоставления рис. 8 (а) и рис. 8 (б), например, следует, что для изучения границ, залегающих под высокоскоростным слоем, излучаемую источником энергию необходимо сконцентрировать в более узком интервале углов $\alpha_{min} - \alpha_{max}$, что потребует увеличения базы группы D в продольной плоскости XOZ.

Закключение

В настоящей работе кратко рассмотрены основные принципы построения групповых пневматических источников для морской сейсморазведки. Показано, что наиболее важными факторами, определяющими выбор параметров источников и конкретной технологии исследований, являются характер геологических задач и сейсмогеологические условия, зависящие, прежде всего, от глубины моря в районе работ.

Описан простой метод расчета конфигурации линейных подгрупп с гашением пульсаций, а также рассмотрены примеры построения на их основе линейных и площадных групп с выраженными свойствами направленности. Для более точного и обоснованного выбора методики сейсморазведочных работ, в том числе параметров группирования пневматических источников, рекомендуется пользоваться современными программными средствами, предназначенными



▲ Рис. 6. Выбор ширины лепестка диаграммы направленности группы: X_{min} – вынос приемного устройства; X_{max} – координата дальнего конца приемного устройства: $X_{max} = X_{min} + L$; L – длина приемного устройства; $X_{cp} = X_{min} + L/2$ – средняя точка косы; H – глубина отражающей границы

для моделирования сейсмических волновых полей и расчета характеристик любых линейных и площадных интерференционных систем на основе пневматических излучателей.

Список литературы

1. Гуленко В.И. Пневматические источники упругих волн для морской сейсморазведки: Монография. – Краснодар: КубГУ. 2003, – 313 с.
2. Гуленко В. И., Бадиков Н.В. Акустические характеристики пневматических излучателей «Пульс-5» и различных вариантов линейных групп на их основе // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки. 2001. №1. С.23-32.
3. Гуленко В. И., Карпенко В. Д., Шлыков В.А. Теоретическое и экспериментальное исследование пневматических излучателей для морской сейсморазведки // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки. 2002. №3. С.50-58.
4. Гуленко В.И., Шумский Б.В. Технология морской сейсморазведки на предельном мелководье и в транзитной зоне: Монография. – Краснодар: КубГУ. 2007, – 111 с.
5. Гуленко В.И., Гонтаренко И.А. Разработка программных средств для экспресс моделирования сейсмических волновых полей // В сборнике «Георесурсы», Изд-во Казанского госуниверситета, №1(43), 2012 г. С. 15 – 18.

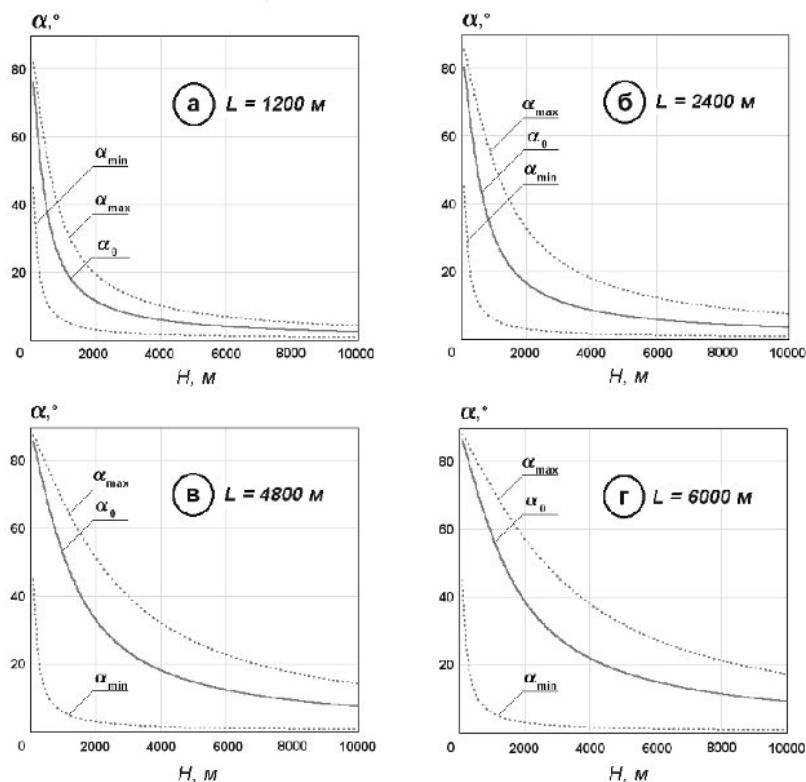


Рис. 7. Зависимости $\alpha_0(H)$, $\alpha_{min}(H)$ и $\alpha_{max}(H)$, рассчитанные для приемных устройств разной длины:
 а – $L = 1200$ м;
 б – $L = 2400$ м;
 в – $L = 4800$ м;
 г – $L = 6000$ м

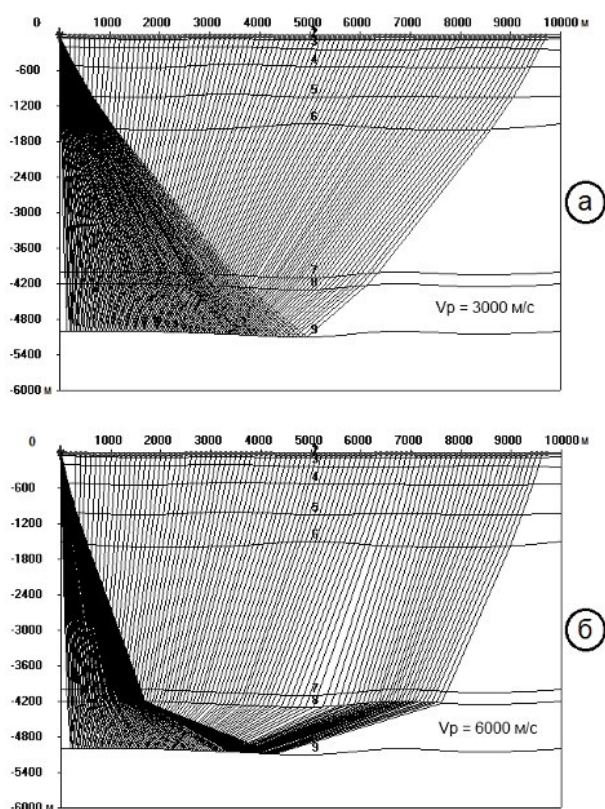


Рис. 8. Лучевые диаграммы отраженных волн, полученные для двух модельных разрезов, отличающихся значениями скорости V_p в девятом слое

6. Гуленко В.И., Рудаков А.В. Технология сейсморазведочных работ 3D в акватории Печорского моря // Геоинжиниринг, 2013. №2(18), С.68-71.

7. Самсонов Е.А. Сравнительная характеристика высокоразрешающей сейсморазведки (ВРС) и ультра-ВРС при инженерных изысканиях на акваториях // Сб. материалов 39 сессии Международного научного семинара им. Успенского. Воронеж 30 января – 02 февраля 2012 г. – С.246.

8. Мелководное сейсмическое судно НИС «Искатель-5»: Материалы ОАО «Севморнефтегеофизика» – <http://www.smng-geophysics.com/i/iskatel5-rus.pdf>.

9. Johnston R.C., Reed D.H., Desler J.F. Special report on the SEG Technical Standards Committee: SEG Standard specifying marine seismic energy sources // Geophysics 1988. Vol. 53. № 4, p.p.566 – 575.

10. Hatton L. «Gundalf™ – an airgun array modelling package» – <http://www.gundalf.com>

11. L. Hatton. The broadband acoustic output of marine seismic airgun sources // Proceedings of the Institute of Acoustics, Underwater Noise, 2008, Southampton, England. 2008.