

УДК 520.8

ВЕРОЯТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РАССЕЙНИЯ ФАКЕЛОВ ВЫБРОСА ГАЗА С ПОДВОДНОГО ТРУБОПРОВОДА

© А.И. Гончар, С.И. Донченко, А.Г. Мартынюк, Л.И. Шлычек, 2008

Научно-технический центр панорамных акустических систем НАН Украины, г. Запорожье

В наведеній роботі показано метод обчислення характеристик розсіювання факелів викиду газу при пошкодженні підводного трубопроводу. Газовий факел апроксимується фізичною моделлю в вигляді відбиваючого циліндра або вертикально орієнтованого тіла обертання, висота якого h дорівнює глибині залягання трубопроводу в місці його пошкодження, тобто глибині місця. Обчислення виконані в деяких оптимальних кутових секторах вертикальної площини і наведені в розмірах еквівалентних радіусів ідеальних сфер, сила цілі котрих T дорівнює їй же для фізичної моделі газового факела в залежності від напрямку θ випромінювання-прийому гідролокатора. Подано рекомендацію оптимального способу локації таких пошкоджень.

В представленной работе показан метод вычисления характеристик рассеяния факелов выброса газа как при повреждении подводного трубопровода, так и при выделении с морского дна. Газовый факел аппроксимируется физической моделью в виде отражающего цилиндра или вертикально ориентированного тела вращения, высота которого h равна глубине залегания трубопровода в месте его повреждения или глубине места. Вычисления выполнены в некоторых оптимальных угловых секторах вертикальной плоскости и приведены в размерах эквивалентных радиусов идеальных сфер, сила цели которых T равна таковой для физической модели газового факела в зависимости от направления θ излучения-приема гидролокатора. Дана рекомендация оптимального способа локации таких повреждений.

In the present work the calculation technique of the characteristics of scattering of gas blowout plum either because of damage of the underwater pipeline or because of extraction from the sea bottom is represented. Gas plum is approximated by physical analog in reflecting cylinder or vertically oriented body of revolution with height h , which is equal to the depth of pipeline in the place of it damage or to the place depth. The calculations are realized in some optimal angular domain of vertical plane and given in dimensions of equal radius of ideal spheres, which target strength T is equal to this strength for the physical analog of gas plum in dependence of direction θ of emission-reception of sonar. The recommendation of the optimal method of such damage location is presented.

ЭКВИВАЛЕНТНЫЙ РАДИУС, ГАЗОВЫЙ ФАКЕЛ, АППРОКСИМАЦИЯ, ПОДВОДНЫЙ ТРУБОПРОВОД, МОРСКОЕ ДНО

Имеющийся опыт наблюдения за истечением жидкости из различных типов отверстий дает основание считать, что первоначально вытекающая через свищ нефть имеет форму струи [1], на некотором расстоянии распадающейся на отдельные капли (при малых интенсивностях утечек капли будут образовываться сразу же на свище). Образовавшиеся нефтяные капли будут постепенно всплывать к поверхности моря, так как плотность нефти существенно меньше плотности морской воды.

Скорость всплытия нефтяных капель зависит от их размеров, поэтому по мере всплытия нефтяные капли разделяются по размерам, образуя кластеры (пятна) близких по размерам капель. Разделение кластеров в пространстве осуществляет также течение, под действием которого капли различных размеров сносятся в различной степени течением в горизонтальной плоскости. Однако, основная масса нефтяных капель со средними и близкими к средним размерами формирует шлейф, поднимающийся к поверхности моря, подобно струе дыма. Именно этот объект – протяженный шлейф нефтяных капель

представляет интерес с точки зрения утечек из подводных трубопроводов. Основными характеристиками такого объекта являются размеры нефтяных капель, расстояние между ними, вертикальные и горизонтальные размеры шлейфа.

Интенсивность утечки нефти через свищ можно оценить, используя известные методы гидравлики для истечения через затопленное отверстие, причем при малых размерах свища его канал в стенке трубы рассматривался как цилиндрический насадок. Размеры вытекающих капель нефти зависят от размеров свища и условий истекания. При малых утечках размер капли определяется балансом плавучести капли и удерживающего каплю поверхностного натяжения по периметру отверстия свища. С ростом перепада давления отрыв капель происходит быстрее, их размеры несколько уменьшаются, а затем происходит переход к струйному режиму истечения нефти.

В процессе всплытия нефтяные капли сначала образуют тонкий жгут, а затем рассеиваются турбулентностью морской среды в вертикальном и горизонтальном направлении и сносятся от места образования течением, формируя поднимающийся к поверхности моря шлейф. Размеры этого шлейфа можно оценить, рассматривая диффузию капель нефти как активной (всплывающей) примеси.

Решение полуэмпирического уравнения турбулентной диффузии с граничным условием поглощения примеси на поверхности моря имеет следующий вид [1]:

$$c_0(x, y, z) = \frac{Q_h}{4\pi\sqrt{K_\ell K_z x}} \exp\left(-\frac{y^2 V}{4K_\ell x}\right) \cdot \left\{ \exp\left[-\frac{(z - w_0 x/V)^2 V}{4K_z x}\right] - \exp\left[-\frac{(2H_0 - z - w_0 x/V)^2 V}{4K_z x}\right] \right\}, \quad (1)$$

где x, y, z – прямоугольная система координат с началом в источнике нефти и с совпадающей с вектором скорости течения V осью x ,

c_0 – концентрация нефти,

Q_h – интенсивность утечки,

K_ℓ, K_z – коэффициенты диффузии в горизонтальном и вертикальном направлении,

w_0 – скорость всплытия капель,

H_0 – глубина моря.

Результаты расчета по формуле (1) для утечки из свища диаметром 5 мм трубопровода, проложенного на глубине 20 м при интенсивности утечки 0,315 л/с, скорости всплытия капель нефти 9,5 м/с, скорости дрейфового течения 0,18 м/с показали, что протяженность шлейфа составляет около 37 м, максимальный горизонтальный размер ≈ 9 м, а максимальный вертикальный размер шлейфа ≈ 5 м (рис. 1) [1].

Шлейф нефтяных капель, всплывающих из свища на подводном трубопроводе (рис. 1) имеет форму трапецевидного тела. Такое тело можно аппроксимировать прямоугольником, имеющим наклон шлейфа, определяемый скоростью течения.

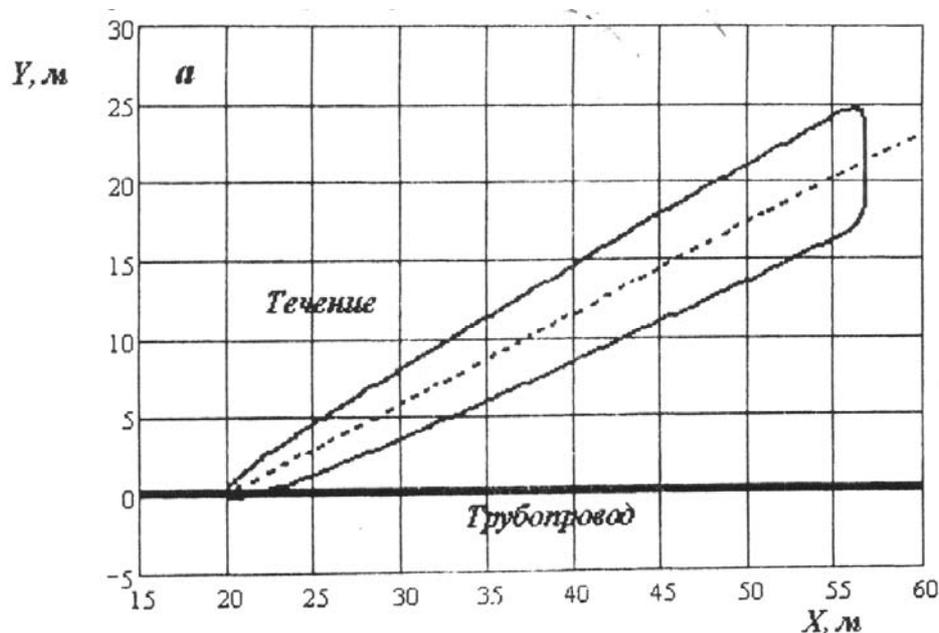


Рис. 2 - Шлейф нефтяных капель, всплывающих из свища на подводном трубопроводе – вид сверху [1].

Сила цели всякого объекта определяется отношением энергий в отраженной от него и падающей на него звуковых волнах. Это отношение, в свою очередь, зависит от размеров и формы отражающей поверхности и ее отражающих свойств, т.е. от различия волновых сопротивлений объекта и воды. Любой объект может быть приравнен «эквивалентному» сферическому отражателю, сила цели которого равна таковой данного объекта.

Сила цели T такой идеальной сферы в зависимости от ее радиуса R определяется соотношением [2, 3]:

$$T = 10 \lg \left(\frac{R^2}{4} \right). \quad (2)$$

Если капельный шлейф нефти аппроксимировать телом прямоугольной формы, то сила цели тела прямоугольной формы может быть представлена выражением [4]:

$$T = 10 \lg \left[\left(\frac{a \cdot b}{\lambda} \right)^2 \times \left(\frac{\sin \beta}{\beta} \right)^2 \times \cos^2 \theta \right], \quad (3)$$

где a, b – стороны прямоугольника, м;

λ – длина звуковой волны излучаемого сигнала, м;

$$\beta = ka \cdot \sin \theta;$$

θ – угол между направлением падения звуковой волны и нормалью к плоскости, содержащей сторону a , рад.

Отсюда эквивалентный радиус цели такого тела

$$R_{\text{экв}} = 2 \left[10^{(T/10)} \right]^{1/2}. \quad (4)$$

Условия применимости соотношения (3)

$$kb \gg 1 \quad a > b; \quad (5)$$

расстояние от гидролокатора до цели должно удовлетворять соотношению

$$r > \frac{a^2}{\lambda}. \quad (6)$$

Зависимость $R_{\text{экв}}$ от угла θ определяется выражением (4) с учетом выражения (3) и приведена на рис. 3.

Представленные графиками значения будут значительно меньше из-за небольшой разницы волновых сопротивлений (ρc) воды и нефти.

Вертикально ориентированные факелы поднимающегося вверх газа, «дыхание» подводных вулканов (рис. 4) можно аппроксимировать вытянутым в высоту телом вращения [7].

Сила цели такого тела вращения может быть выражена соотношением [4]:

$$T = 10 \lg \left(\frac{16\pi^2 V^2}{\lambda^4} \right), \quad (7)$$

где V – объем тела вращения, м³;

λ – длина звуковой волны излучаемого сигнала, м.

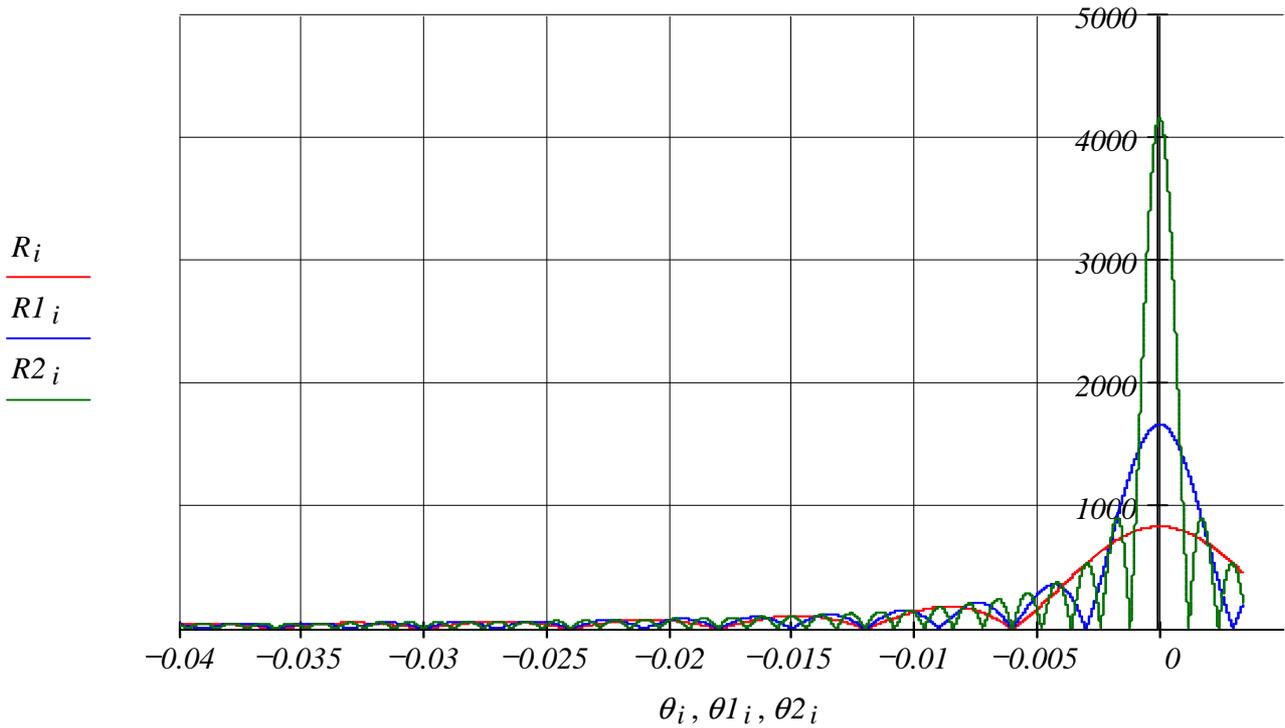


Рис. 3 - Зависимость эквивалентного радиуса цели шлейфа нефтяных капель, всплывающих из свища на подводном трубопроводе (значения угла θ приведены в радианах, а значения эквивалентного радиуса цели для зондирующих частот 5 кГц - R_i , 10 кГц - $R1_i$ и 25 кГц - $R2_i$ - в метрах)

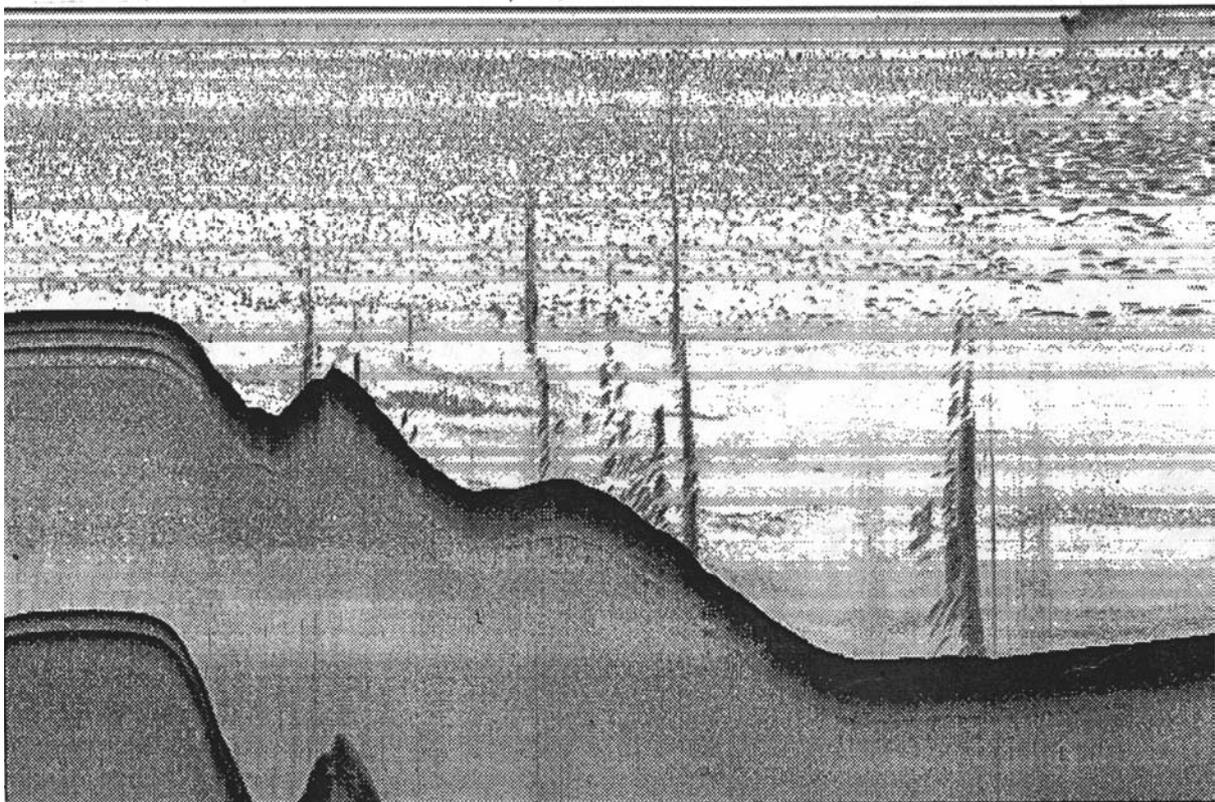


Рис. 4 - Факелы поднимающегося вверх из дна моря газа [7].

Соотношение (7) предусматривает падение звуковой волны вдоль оси вращения тела (факела), что отвечает условиям работы гидролокаторов бокового обзора и эхолотов.

Газовый факел можно аппроксимировать относительно тонким и высоким цилиндром от дна, где залегает трубопровод, до поверхности воды.

Сила цели для цилиндра конечной высоты h без учета влияния его торцов определяется соотношениями [4]:

$$T = 10 \log \left[\frac{ah^2}{2\lambda} \left(\frac{\sin \beta}{\beta} \right)^2 \cos^2 \theta \right], \quad (8)$$

где $\beta = \frac{2\pi}{\lambda} h \sin \theta$;

$a = d/2$ – радиус цилиндра, м;

h – высота цилиндра, м;

$\lambda = c/f$ – длина волны зондирующего сигнала, м;

$c = 1500$ м/с – скорость звука в воде;

f – частота зондирующего сигнала, Гц;

θ – направление падения фронта волны относительно нормали n к поверхности цилиндра, рад.

Значения эквивалентных радиусов R_i в метрах вычисляются по формуле (3) с учетом значения силы цели, выраженной формулой (8). Значения угла θ выражены в радианах.

При этом должны выполняться условия применимости формулы (3):

1) расстояние от гидролокатора до факела-цилиндра должно удовлетворять соотношению:

$$r > \frac{h^2}{\lambda}, \quad (9)$$

2) радиус факела-цилиндра a должен удовлетворять соотношению

$$\frac{2\pi}{\lambda} a \gg 1. \quad (10)$$

Характеристика рассеяния факела-цилиндра в горизонтальной плоскости будет иметь вид характеристики направленности цилиндрического преобразователя такой же формы и размеров. Направление волнового фронта в этом случае будет совпадать с направлением нормали к цилиндрической поверхности, т.е. угол φ в горизонтальной плоскости, которым заменяется в формуле (8) угол θ , будет равен нулю. При этом формула (8) для горизонтальной плоскости приобретает вид:

$$T_1 = 10 \log \left(\frac{ha^2}{2\lambda} \right). \quad (11)$$

Следовательно, характеристика рассеяния в горизонтальной плоскости будет круговой.

На рис. 5, 6 приведены вычисленные характеристики рассеяния факела-цилиндра на разных частотах. При вычислениях не учтено возможное поглощение падающей на цилиндр волны образующими цилиндр пузырьками газа, однако, как следует из результатов расчетов, во всем диапазоне углов визирования характеристики рассеяния факелов имеют значения, существенно превышающие те, которые соответствуют обнаруживаемым гидролокаторами бокового обзора объектам с вероятностью $P \geq 0,9$ на фоне донной реверберации[8].

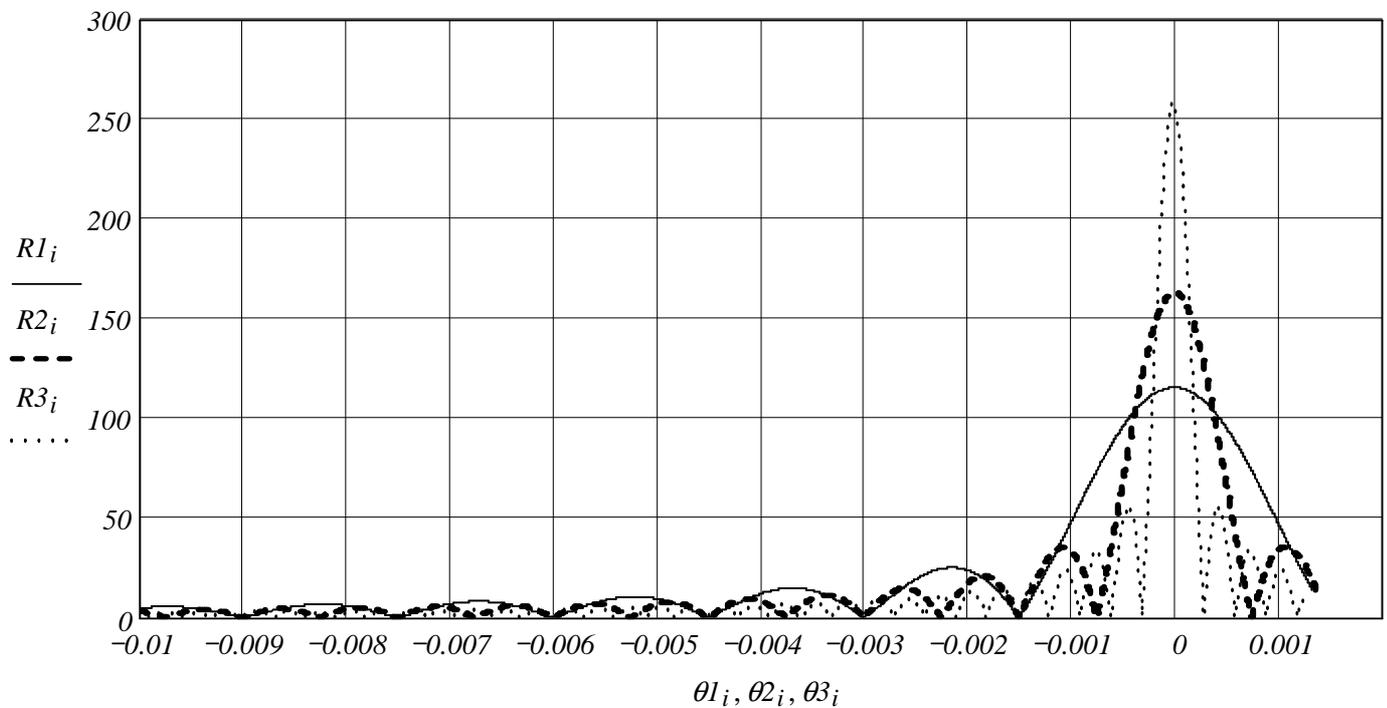


Рис. 5 - Зависимость эквивалентного радиуса цели газового факела, представленного в виде цилиндра, от угла визирования и частоты зондирующего сигнала
 Параметры факела: $a=0,4$ м $h=50$ м. Рабочие частоты:
 для $R1_i$ – 10 кГц, для $R2_i$ – 20 кГц, для $R3_i$ – 50 кГц.

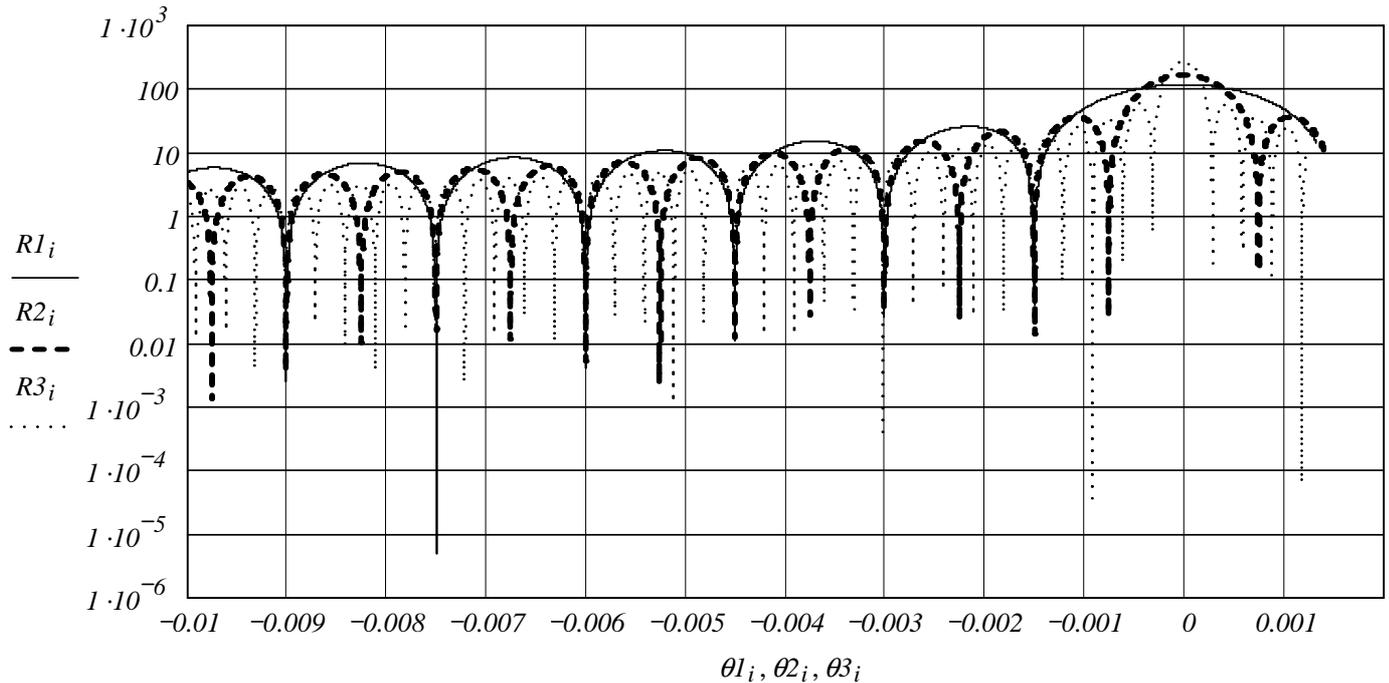


Рис. 6 - Зависимость (в логарифмическом масштабе) эквивалентного радиуса цели газового факела, представленного в виде цилиндра, от угла визирования и частоты зондирующего сигнала
 Параметры факела: $a=0,4$ м, $h=50$ м. Рабочие частоты:
 для $R1_i$ – 10 кГц, для $R2_i$ – 20 кГц, для $R3_i$ – 50 кГц.

Таким образом, выполненные расчеты подтверждают возможность обнаружения газовых и нефтяных выбросов из поврежденных трубопроводов, а также выбросов газа из дна водоемов гидроакустическими методами с помощью эхолотов, профилографов и гидролокаторов бокового обзора.

Литература

1. И. В. Алешин, В. К. Гончаров, и др. Динамика и оптическая диагностика выбросов и утечек нефти из морских донных трубопроводов //Труды V111 международной конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики (ГА-2006)». СПб, 2006 - С.289-292
2. Дж. В. Стретт (лорд Рэлей). Теория звука, т.2. – М. Гостехиздат, 1955.
3. О.С.Голод, Ю.А.Гончар, С.И.Донченко, Г.А.Мартынюк Методика измерения отраженного подводным объектом сигнала и определение его эквивалентного радиуса// Гидроакустический журнал №3.-Запорожье, НТЦ ПАС НАН Украины, 2006. - С.96-102
4. Роберт Дж. Урик. Основы гидролокации. – Л., Судостроение, 1978.
5. Дж. В. Стретт (лорд Рэлей). Теория звука, т.2. – М. Гостехиздат, 1955.
6. Распространение ультракоротких волн. – Перев. с англ., М. Сов. радио, 1954.
7. Е.Е. Совга, С.П. Любарцева, А.А. Любицкий. Анализ результатов наблюдений и методы расчета гидрофизических полей океана. – Морской гидрофизический институт НАН Украины, Севастополь, 2007 .
8. Гончар А.И. Проблема создания высокоэффективных многоцелевых гидролокаторов бокового обзора. – Запорожье, НТЦ ПАС НАН Украины, 1998 г.