

---

**С.В. Гошовський, П.Т. Сиротенко**

Український державний геологорозвідувальний інститут, Київ

## **ЕФЕКТ ДОППЛЕРА ЯК ШЛЯХ ОТРИМАННЯ ДОДАТКОВОЇ ІНФОРМАЦІЇ ТА ОЦІНКИ ЗМІНИ ШВИДКОСТІ В МОРСЬКОМУ СЕРЕДОВИЩІ ПРИ ГАЗОВИХ ПРОСОЧУВАННЯХ З МОРСЬКОГО ДНА**

*Проведено аналіз можливості застосування ефекту Доплера для виявлення газових бульбашок, які виникають при просочуванні природного газу з морського дна. На сьогодні при використанні акустичного діапазону частот для зондування водяного стовпа з газовими бульбашками вважаємо доцільним виявляти газові бульбашки в морському середовищі та оцінювати швидкість їх підйому до морської поверхні і встановлювати траєкторію руху бульбашок та їх кількість. Для класифікації різних за розмірами бульбашок і оцінки їх концентрації необхідно використовувати як звуковий, так і ультразвуковий діапазони частот для зондування середовища. Однак при дослідженнях на ультразвуковому діапазоні частот буде зменшуватись досліджувана область морського середовища через сильне їх поглинання. Вважаємо, що запобігти цьому стану може використання нелінійної акустики, яка до того ж дозволяє отримати ідеальну діаграму спрямованості випромінювання без бокових пелюстків та виконувати зондування на сформованих більш низьких частотах, ніж при використанні лінійної акустики. Застосування теорії Доплера в морських дослідженнях просочування природного газу дозволяє підвищити ефективність розвідки і видобування.*

**Ключові слова:** газові бульбашки, зображення водяного стовпа, класифікація бульбашок, нелінійна акустика.

Однією з перешкод для успішного використання вуглеводневого ресурсу Чорного моря є недостатні обсяги пошуків та вивчення газових сипів і грязьових вулканів. Техніка та методи фіксації їх місця знаходження не в повній мірі забезпечують потреби та побажання геологів. Ехолоти, що сьогодні застосовуються, здатні надати тільки якісні характеристики і, як правило, в одній площині. Вирішити цю проблему, на нашу думку, можливо з допомогою застосування приладів, побудованих на основі доплерівської теорії.

© С.В. ГОШОВСЬКИЙ, П.Т. СИРОТЕНКО, 2017

У 1842 році австрійський вчений Допплер теоретично обґрунтував залежність частоти, що сприймається спостерігачем від швидкості та напрямку руху джерела хвиль і спостерігача відносно один одного. В ультразвуковій доплерівській локації зазвичай є нерухоме джерело (випромінювач), нерухомий спостерігач (приймальний перетворювач) і рухомий відбивач (або розсіювач) ультразвуку. Ефект Допплера при русі джерела звуку обумовлений зміною довжини хвилі в середовищі, при русі приймача – зміною швидкості звуку в системі координат, пов'язаною з приймачем, а при розсіянні рухомим тілом – обома факторами. Таким чином, на основі ефекту Допплера частота прийнятого сигналу, відбитого від досліджуваного об'єкта, може відрізнитися від частоти випромінюваного сигналу, а різниця залежить від співвідношення швидкостей об'єктів відносно один одного. Для вимірювання швидкості вимірник має антенну систему з кількома (3 або 4; рис.1, 2) [2] вузьконаправленими променями діаграми спрямованості. Прийнятий по кожному з цих променів сигнал має доплерівську частоту, пропорційну проекції вектору швидкості об'єкта на цей промінь. Відомо, що для вимірювання вектору швидкості достатньо трьох променів, які зазвичай не лежать в одній площині, але іноді використовуються чотири промені, що дає деяку надмірність без помітного ускладнення конструкції. Безсумнівно, цей метод вимірювань потребує вузько направлених діаграм спрямованості антен, які, як правило, мають значні габарити. До того ж відхилення кутів антен від номінального значення, наприклад, з-за температурних деформацій, призводить до погрешностей вимірювань. Також напрямок приходу максимального відбитого сигналу може відрізнитися від напрямку максимуму діаграми спрямованості у випадку, коли потужність відбитого сигналу різко падає зі зменшенням кута падіння променя, що також призводить до методичних помилок вимірювання, а вірніше погіршується якість отриманого матеріалу при дослідженнях через зменшення відношення сигнал/перешкода.

Сьогодні ефект Допплера має широке застосування в радіолокації, оптиці, акустиці (гідроакустиці), фізиці і медицині [1–9]. Найбільшого розповсюдження набув акустичний доплерівський профілограф швидкості течії (англійська аббревіатура – ADCP) – це прилад для вимірювання профілю швидкості течії у водній товщі, який ґрунтується на ефекті Допплера. Відомо, що принцип дії таких профілографів заснований на вимірюванні величини зміщення частоти відбиття сигналу відносно частоти випромінюваного акус-



**Рис. 1.** Автоматичний автономний доплерівський профілограф швидкості течій серії Workhorse Sentinel компанії Teledyne RDI з робочими частотами 1200, 600 і 300 кГц. Чотири променеві рішення підвищують надійність даних та забезпечують додатковими вимірюваннями даних у випадку блокування або пошкодження одного з променів. Покращення якості даних дозволяє отримати мінімальну помилку визначення швидкості [2]



**Рис. 2.** Акустичний доплерівський профілограф швидкості течій Workhorse Horizontal (H-ADCP) компанії Teledyne RD Instruments. Горизонтально орієнтована акустична система для профілювання швидкості течії та вимірювання хвильових параметрів в поверхневих шарах [2]

тичного сигналу та часу його отримання. Зважені у воді частинки, зокрема планктон, бульбашки газу чи повітря тощо, які відбивають сигнал зондування і внаслідок чого надають змогу йому повернутися до збудника профілографа, при цьому частота відбитого сигналу несе інформацію як про частоту зондування, так і про величину зміщення пропорційно швидкості потоку. До того ж частота відбитого сигналу залежить від напрямку руху відбивача відносно джерела випромінювання акустичних сигналів. Так відбивачі, що рухаються в напрямку до збудника акустичних сигналів, породжують сигнал, який має збільшену частоту, і навпаки, при русі від збудника сигналу відбувається зменшення частоти відбитого сигналу [2].

Визначення величини зміщення відбитого акустичного сигналу і час поширення «пінга» надає можливість вирахувати швидкість потоку на визначеній глибині. Оскільки рух флюїду може відбуватися в будь-якому напрямку, то для досягнення більш високої точності визначення руху в конструкції ADCP доцільно застосовувати три або навіть чотири випромінювача (рис.1, 2) [2], які генерують акустичні імпульси в різні напрямки, що дозволяє підвищити точність визначення швидкості досліджуваного об'єкта та вирахувати напрямок руху течії. Також в алгоритмі профілювання застосовують два основні припущення [2], а саме:

- флюїдний потік відбиття переміщується з однією і тією ж швидкістю;
- кожен з променів збудника виконує виміри в однакових умовах.

При виконанні профілювання стовпа води зондування ділиться по вертикалі на множини сегментів, які також ще називають інтервалами по глибині. Для отримання вертикального профілю швидкості потоку відбитий імпульс для кожного інтервалу по глибині окремо розташовують в точці посередині інтервалу. До того ж профілограф завжди вимірює швидкість руху інтервалу відносно збудника профілографа. При цьому, якщо виміри проводяться з рухомого судна, то для отримання дійсної швидкості потоку повинна бути визначена швидкість руху профілографа або судна відносно морського дна. Тоді дійсно швидкість водяного потоку в кожному інтервалі стовпа води вираховується як різниця швидкості відповідного інтервалу, виміряного з рухомого судна, а швидкість переміщення судна профілографа відносно дна можна виміряти з допомогою опціональної функції профілографа шляхом відслідковування дна або з допомогою відомої GPS навігації, якою сьогодні комплектуються більшість суден [2]. В морських акустичних дослідженнях провідною у світі компанія є Teledyne RD Instruments (США), що виконує розроблення і виготовлення акустичних доплерівських профілографів [2].

Таким чином, акустичний доплерівський вимірювач течії (ADCP) є приладом для виміру профілю течії у водній товщі, який ґрунтується на доплерівському ефекті. Такий прилад періодично випромінює акустичний сигнал необхідної частоти, котрий в морських умовах відбивається від планктону або дрібних бульбашок повітря чи газу. Вимірюючи зміщення частоти відбитого сигналу і час його приходу можливо отримати оцінку швидкості течії на заданій глибині. Як було сказано вище, зазвичай застосовують не один, а три або чотири випромінювачі акустичного сигналу, що дозволяє визначити напрямок течії і збільшити точність визначення швидкості течії [1, 2, 8, 9].

Оскільки судно рухається відносно морського дна, то його швидкість, як за величиною, так і за напрямом повинна бути точно відомою. Ця задача сьогодні вирішується з допомогою високоточної системи навігації GPS. Існуючі доплерівські акустичні вимірювачі течій значно простіші традиційних профілювальних систем. Вони випромінюють неперервний сигнал і заміряють локальну швидкість біля самого вимірювача, що простіше ніж визначення профілю швидкості на різних відстанях. Сьогодні в процесах акустичних вимірювань досягають точність визначення течії до  $\pm 0,15$  см/с за величиною та  $\pm 5^\circ$  за напрямом, а глибина доплерівських вимірювань у водяному стовпі можлива більше ніж на 1000 м [2].

Проведений аналіз показує, що ефект Допплера виявляє залежність спостереженої частоти періодичного коливання від будь-якої зміни відстані між джерелом коливань і спостерігачем. Поза всяким сумнівом акустика рухомих середовищ і основні положення теорії Допплера [9] ще не знайшли необхідної уваги в морській гідрофізиці. Насамперед це відноситься до пошуків і розвідки нетрадиційних вуглеводневих ресурсів, зокрема при дослідженнях газових просочувань з морського дна та викидів в атмосферу газів, які викликають найбільший «парниковий» ефект або забруднення навколишнього середовища. Існуючі просочування з морського дна природного газу якнайкраще підпадають під дію теорії Допплера, тому що існують рухомі неоднорідності в морському середовищі, які викликані рухом газових бульбашок. Знання параметрів бульбашок у воді і швидкості їх підйому з морського дна нададуть інформацію як для виявлення бульбашок, так для визначення концентрації вільного газу в морській воді.

## **Висновки**

Застосування теорії Допплера в морських дослідженнях дозволяє підвищити точність визначення місць просочування природного газу (сипів) на морському дні, а також установити об'єм витоків природного газу в українському секторі Чорного моря.

На сьогодні найбільш актуальною задачею для України є освоєння всіх видів енергетичних ресурсів, які знаходяться в її надрах, у тому числі задіяти найбільш повно морський вуглеводневий потенціал в енергетичному балансі держави.

В Україні є достатній науковий і інженерний потенціал, щоб створювати новітні технології для освоєння малопотужних джерел енергії, в тому числі морського походження, а це дозволить приростити вуглеводневі ресурси в українському секторі Чорноморського басейну.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Акустический доплеровский измеритель течения (ADCP). Материал из Википедии. URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Акустический\\_доплеровский\\_измеритель\\_течения](https://ru.wikipedia.org/wiki/Акустический_доплеровский_измеритель_течения)
2. Акустические доплеровские профилографы течения. URL: <http://www.demetra.5.kiev.ua/catalog/akustic-doplerovskie-profilografi-skorosti-techenia>
3. Блохинцев Д.И. Акустика неоднородной движущейся среды. 2-е издание/ Д.И. Блохинцев. М.: Наука. 1981. 207 с.
4. Доплеровский измеритель. Материал из Википедии. URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Доплеровский\\_измеритель](https://ru.wikipedia.org/wiki/Доплеровский_измеритель)
5. Ефект Доплера. Матеріал з Вікіпедії. URL: [https://uk.wikipedia.org/wiki/Ефект\\_Доплера](https://uk.wikipedia.org/wiki/Ефект_Доплера)
6. Измеритель течений, основанные не эйлеровском подходе к гидродинамике. 14.06.2009-перевод Тронь Александр Анатольевич// Физическая океанология, учебник Р. Стюарта. Раздел 10.9.
7. Кологримов В.Н. Эффект Доплера в классической физике/В.Н. Кологримов. — М.: МФТИ. 2012. 32 С.
8. Эффект Доплера. Материал из Википедии. URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Эффект\\_Доплера](https://ru.wikipedia.org/wiki/Эффект_Доплера)
9. Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP)/Вудхольский океанографический институт (03.04.2009)/

Стаття надійшла 16.11.2017

С.В. Гошовский, П.Т. Сиротенко

## ЭФФЕКТ ДОППЛЕРА ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИИ И ОЦЕНКИ ИЗМЕНЕНИЯ СКОРОСТИ В МОРСКОЙ СРЕДЕ ПРИ ГАЗОВОМ СОЧЕНИИ С МОРСКОГО ДНА

Проведен анализ возможности применения эффекта Доплера для выявления газовых пузырьков, возникающих при утечке природного газа с морского дна. На сегодня при использовании акустического диапазона частот для зондирования водяного столба с газовыми пузырьками считаем целесообразным выявлять газовые пузырьки в морской среде, оценивать скорость их подъема к морской поверхности и устанавливать траекторию движения пузырьков и их количество. Для классификации различных по размерам пузырьков и оценки их концентрации необходимо использовать как звуковой, так и ультразвуковой диапазоны частот для зондирования среды. Однако при исследованиях на ультразвуковом диапазоне частот будет уменьшаться исследуемая область морской среды из-за сильного их поглощения. Считаем, что предотвратить это состояние может использование нелинейной акустики, которая к тому же позволяет получить идеальную диаграмму направленности излучения без боковых лепестков и выполнять зондирование на более низких частотах, чем при использовании линейной акустики. Применение теории Доплера в морских исследованиях утечки природного газа позволяет повысить эффективность разведки и добычи.

**Ключевые слова:** газовые пузырьки, изображение водяного столба, классификация пузырьков, нелинейная акустика.

S.V. Goshovsky, P.T. Syrotenko

## DOPPLER EFFECT AS WAYS TO RECEIVE ADDITIONAL INFORMATION AND EVALUATION OF SPEED CHANGE IN THE MARINE ENVIRONMENT IN GAS LEAKING FROM SEABED

An analysis was made of the possibility of using the Doppler effect to detect gas bubbles that arise when impregnating natural gas from the seabed. Today we consider it expedient, when using the acoustic frequency range for sensing a water column with gas bubbles, to detect gas bubbles in the marine environment and estimate the speed of their lifting to the sea surface and establish the trajectory of the movement of bubbles and their number. It is necessary to use both sound and ultrasonic frequency

bands for sounding the environment to classify different sized bubbles and assess their concentration . However, the studied area of the marine environment in research on the ultrasound frequency will reduce by reason of their strong absorption. We believe that nonlinear acoustics can be used to prevent this condition, which in addition allows you to obtain an ideal radiation pattern without side lobes and perform sounding at lower frequencies than using linear acoustics. The application of the Doppler theory in marine surveys of natural gas impregnation can increase its exploration and extraction efficiency.

**Keywords:** gas bubbles, image of a water column, classification of bubbles, nonlinear acoustics.