

УДК 550.82.5

В.Г. Кравченко¹

ИССЛЕДОВАНИЕ ОБОБЩАЮЩИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПУЗЫРЕЙ ПОДВОДНЫХ ГАЗОВЫХ ФАКЕЛОВ

Предложены осреднённые параметры, характеризующие процесс всплытия газовых пузырей применительно к задаче оценки газоотдачи сипа по геометрической форме подводного газового факела. Приведенные зависимости позволяют обобщить результаты гидроакустического зондирования размерного спектра газовых пузырей.

В настоящее время в северо-западной части Чёрного моря выявлено около 400 групп подводных газовых факелов [7,8]. Подводные газовые факелы образуются в результате выхода на поверхность дна газа, преимущественно метана, из глубинных слоёв Земли. По проведенным оценкам [2] удельная объёмная газоотдача (объём газа, поступившего с 1 м^2 дна в единицу времени) отдельных сипов может достигать $0,4 \text{ л/м}^2\text{с}$, что при средних диаметрах сипов $10 - 40 \text{ м}$ [1] эквивалентно поступлению метана из одиночного сипа, расположенного на глубине 70 м в объёме $8 \cdot 10^6 - 130 \cdot 10^6 \text{ нм}^3/\text{год}$. По результатам систематического мониторинга выделение газа происходит стабильно. Месторождение газовых факелов может иметь промышленное значение, и задача оценки его газоотдачи является актуальной.

Пока единственно реальный способ дистанционного определения газоотдачи сипа и соответственно месторождения – оценка газоотдачи по форме факела [2] с использованием его эхограммы. В газовом факеле объёмная концентрация газа может достигать $1 \cdot 10^{-3}$, что создаёт удельную подъёмную силу около 10 Н/м^3 . Подъёмная сила всплывающих пузырей вызывает вертикальный поток воды, который и формирует подводный газовый факел. Дисперсный состав пузырей газа колеблется в широких пределах [1, 5]. Радиус их может изменяться от $0,1$ до 50 мм . При диаметре пузыря более 1 мм он приобретает при всплытии сфероидальную форму. Устойчивая форма пузыря ограничена объёмом 20 см^3 [4]. Как показано в работе [5], мелкие пузыри достаточно интенсивно растворяются в воде. В связи с этим процесс массообмена пузырей с окружающей водой принимается во внимание при аналитическом описании процессов, связанных с формированием факела.

На формирование контура газового факела влияют следующие основные параметры [2]: объёмная концентрация газа у сипа, скорость всплытия пузырей, коэффициент массопередачи от пузыря газа к окружающей среде, площадь поверхности пузырей, глубина расположения сипа и его диаметр. Первые четыре параметра зависят от дисперсного состава пузырей газа. При математическом описании факела среда внутри контура факела рассматривается как гомогенная с изменением отдельных параметров от слоя к слою. В связи с этим параметры, определяемые дисперсным составом пузырей,

© В.Г. Кравченко

¹ ОМГОР ННПМ НАН Украины

должны быть осреднёнными. Дисперсный состав пузырей может быть получен при исследовании с помощью гидроакустического зондирования газовых факелов. При этом возникает задача перехода от дисперсного состава пузырей газа к указанным формообразующим четырём параметрам. Дисперсный состав пузырей газа в основном представляется в виде гистограмм [1, 5] (рис. 1), характеризующих долю пузырей данной размерной группы в общем составе пузырей.

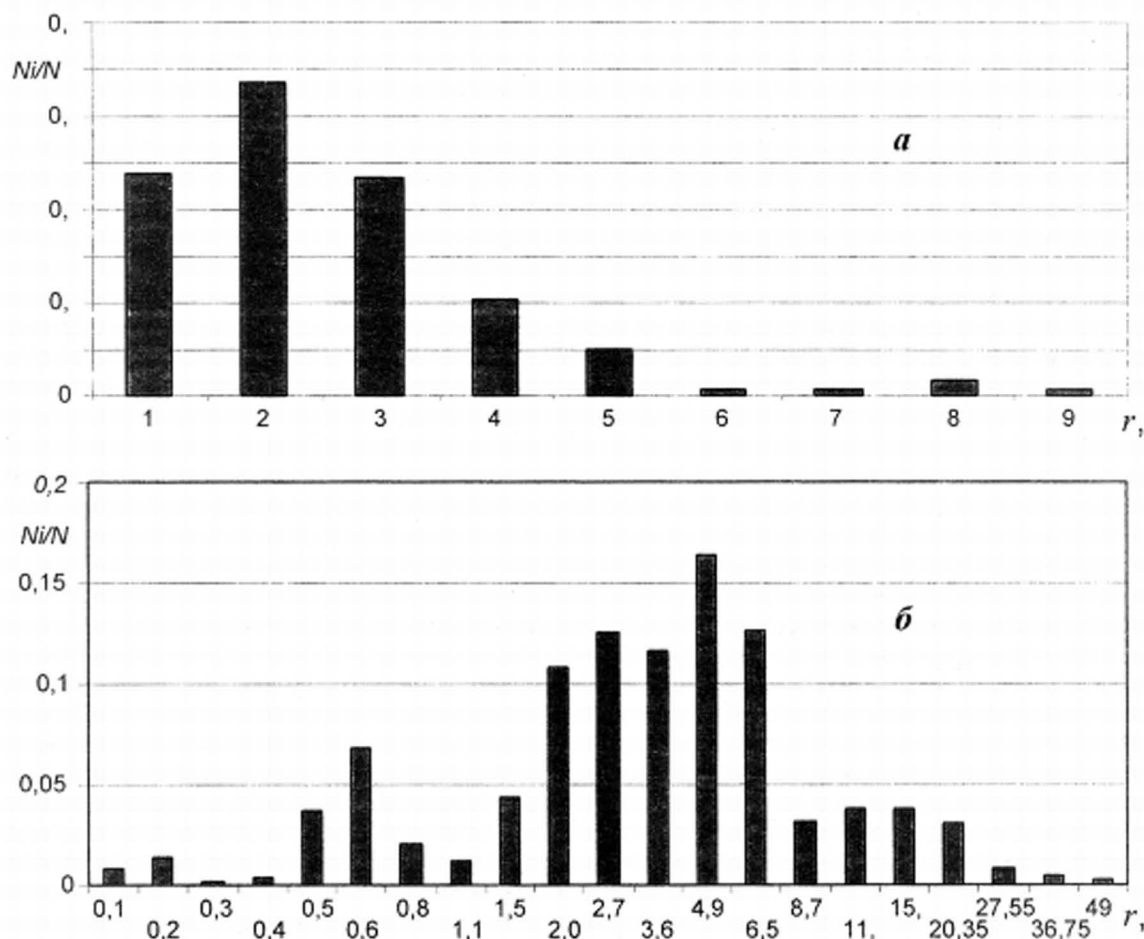


Рис. 1. Размерный спектр пузырей над сипом по данным: а) - [5], глубина 108 ÷ 126 м и б) - [1], глубина около 60 м.

Объёмная концентрация пузырей газа в воде факела у сипа может быть определена как

$$c_v = \sum_{i=1}^n c_{vi} = q_0 \sum_{i=1}^n \frac{\varepsilon_{vi}}{w_i} = q_0 \bar{c}_v,$$

где q_0 – удельная объёмная газоотдача сипа, $\text{м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{с}$;

ε_{vi} – доля в удельной объёмной газоотдаче сипа пузырей i -й размерной группы;

$$\varepsilon_{vi} = \frac{V_{ni} \left(\frac{N_i}{N} \right)}{\sum_{i=1}^n V_{ni} \left(\frac{N_i}{N} \right)} = \frac{\varepsilon_{oi} r_{ni}^3 \left(\frac{N_i}{N} \right)}{\sum_{i=1}^n \varepsilon_{oi} r_{ni}^3 \left(\frac{N_i}{N} \right)};$$

w_i – скорость всплытия пузырей (в относительном движении) i -й размерной группы, м/с; \bar{c}_v – относительная объёмная концентрация пузырей

газа, с/м, $\bar{c}_v = \sum_{i=1}^n \frac{\varepsilon_{vi}}{w_i}$; V_{ni} – объём пузыря i -й размерной группы, м³; r_{ni} –

радиус пузыря, м; $\left(\frac{N_i}{N}\right)$ – отношение числа пузырей i -й размерной группы

к общему числу; e_{oi} – отношение меньшей полуоси сплюснутого сфероида (пузыря) к каждой из остальных полуосей (для шара $e_o = 1$).

Параметр e_{oi} характеризует степень деформации газового пузыря. По материалам статьи [1] определена аппроксимирующая функция для e_o (рис. 2), которая составляет

$$\varepsilon_o = 0,2 + 0,8 \exp\left(-\frac{V_{ni}}{2 \cdot 10^{-7}}\right). \quad (1)$$

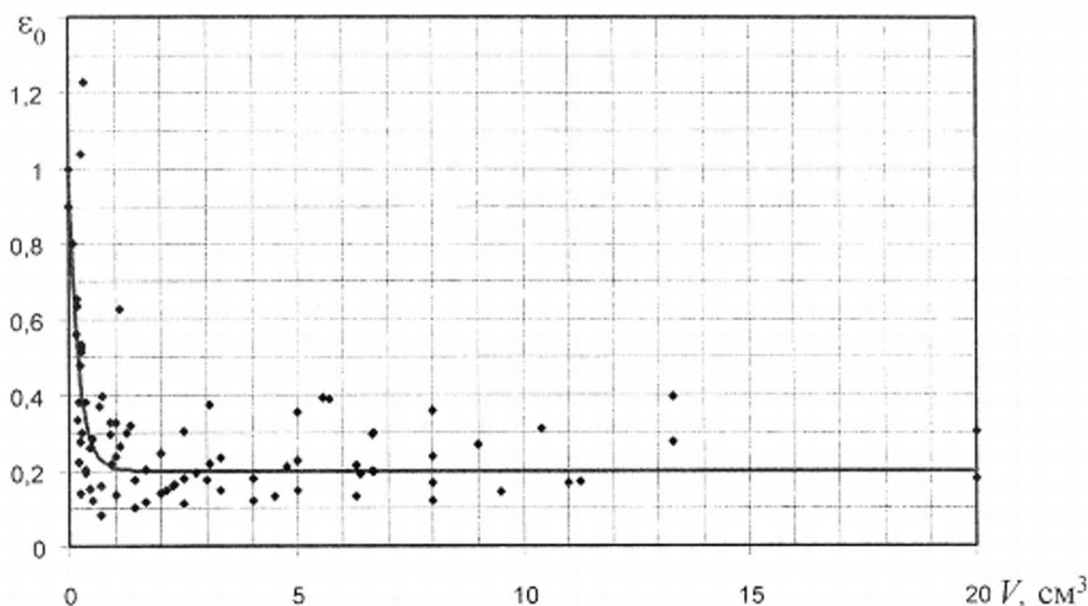


Рис. 2. Поправка для определения объёма пузыря (сплюснутого сфероида).

Скорость всплытия пузырей может быть определена по формуле $w_i = 1,64 \cdot V_{ni}^{0,129}$, м/с [4], которая хорошо коррелируется с материалами [5] для «грязных» пузырей (поверхность которых загрязнена ПАВ) вне зоны сероводородного заражения и за пределами сипа. В зоне сероводородного заражения и непосредственно над сипом при объёме пузыря болсе $4 \cdot 10^{-9}$ м³ скорость всплытия («чистых» пузырей) может определена по зависимости

$$w = 0,24 \exp\left(-\frac{V_{ni}}{2 \cdot 10^{-8}}\right) + 1,64 \cdot V_{ni}^{0,129},$$

которая согласуется с материалами, приведенными в статье [5].

В связи с изложенным, удельная подъемная сила элемента объёма факела определяется как

$$\chi = c_v (\gamma_{ж} - \gamma_g) \approx c_v \gamma_{ж}, \text{ Н/м}^3;$$

где $\gamma_{ж}, \gamma_g$ – удельные веса воды и газа.

Пренебрежение удельным весом газа на глубинах, на которых находится большая часть метановых газовыделений (до 300 м), даёт ошибку в определении удельной подъемной силы, не превышающую 3%.

Средняя скорость всплытия пузырей (в относительном движении) определяется из условия равенства мощности потока пузырей газа со средней скоростью всплытия \bar{w} и мощностей, развиваемых отдельными группами пузырей.

$$\chi \cdot \bar{w} = \gamma_{ж} g_o \sum_{i=1}^n \frac{\varepsilon_{vi}}{w_i} w_i.$$

Поскольку $\sum_{i=1}^n \frac{\varepsilon_{vi}}{w_i} w_i = 1$, то средняя скорость всплытия пузырей состав-

ляет $\bar{w} = \frac{1}{c_v}$.

Площадь поверхности пузырей в единице объёма воды равна

$$\bar{S}_n = \tilde{S}_n \cdot c_v,$$

где \tilde{S}_n – параметр, характеризующий отношение площади поверхности

пузырей к объёму пузырей, $\tilde{S}_n = \frac{3 \sum_{i=1}^n \xi_i r_{mi}^2 \left(\frac{N_i}{N} \right)}{\sum_{i=1}^n \varepsilon_{oi} r_{mi}^3 \left(\frac{N_i}{N} \right)}$

ξ_i – поправка к площади поверхности шара при переходе от шара к эллипсоиду. Поправка ξ_i может быть аппроксимирована линейной зависимостью

$$\xi_i = 0,413 + 0,587 \varepsilon_{oi}, \text{ при } \varepsilon_{oi} \geq 0,2 \quad (2)$$

Для определения интенсивности массопередачи используется так называемая тройственная аналогия подобия полей скоростей, температур и относительных концентраций. Как показывают экспериментальные исследования для течений в трубах, наблюдается аналогия между процессами тепло- и массообмена [6] в широком диапазоне чисел Pr и Sc, (рис. 3), при этом имеют место зависимости

$$\text{для массообмена } St_m = \frac{c_f}{2} Sc^{-2/3}$$

для теплообмена $St_t = \frac{c_f}{2} Pr^{-2/3}$

Где $Pr = \frac{\nu_{ж}}{\bar{a}}$ - число Прандтля; $Sc = \frac{\nu_{ж}}{D}$ - число Шмидта; $St_t = \frac{\alpha}{c_{ж} \gamma_{ж} \cdot w}$

- число Стентона для теплообмена; $St_m = \frac{\beta}{w}$ - число Стентона для массообмена;

c_f - коэффициент трения; $4c_f = \lambda_{тр}$, где $\lambda_{тр}$ - коэффициент сопротивления; $\nu_{ж}$ - коэффициент кинематической вязкости воды, м²/с; \bar{a} - коэффициент температуропроводности воды, $\bar{a} = \frac{\lambda}{c_{ж} \gamma_{ж}}$, м²/с; λ - коэффициент теплопроводности воды, Дж/м·с·град, ккал/м·час·град; $c_{ж}$ - удельная теплоёмкость воды, ккал/кг·град; D - коэффициент молекулярной диффузии метана в воде, м²/с; a - коэффициент теплоотдачи, $\alpha = \frac{\lambda}{2r_n} Nu$, Дж/м²град·с;

β - коэффициент массоотдачи, м/с; w - скорость всплытия пузыря.

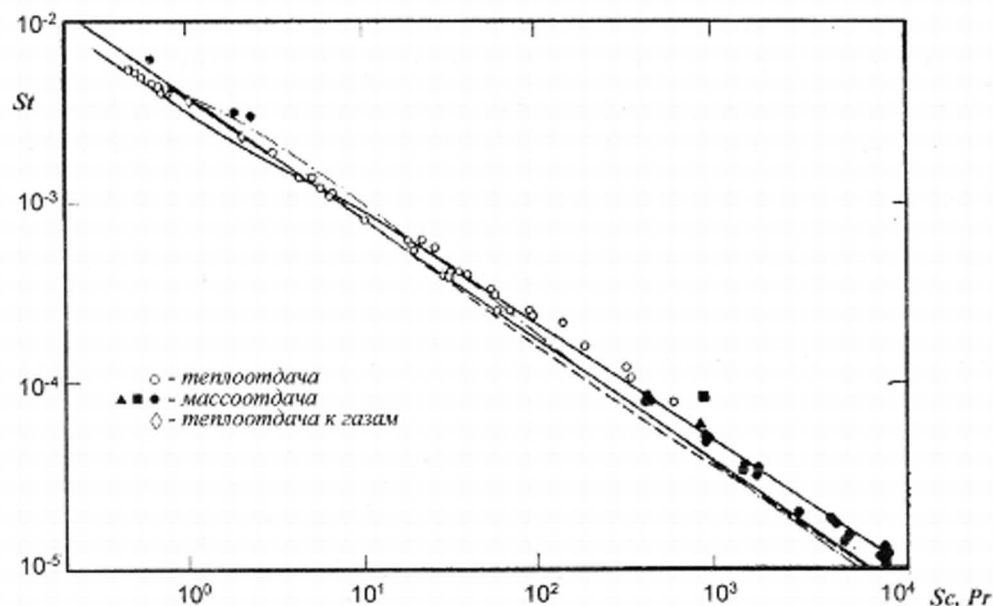


Рис. 3. Экспериментальная зависимость числа Стентона St (при тепло- и массопереносе) от чисел Шмидта Sc и Прандтля Pr для течений в трубах [6].

Считается, что полученные результаты справедливы и для шара (пузыря). Для учёта особенностей граничных условий при определении коэффициента массоотдачи b берётся отношение чисел Стентона для массообмена и теплообмена. В этом случае

$$\frac{St_m}{St_t} = \left(\frac{Pr}{Sc} \right)^{2/3} \quad \text{и} \quad \beta = \frac{\alpha}{c_{ж} g \cdot \rho_{ж}} \left(\frac{D}{\bar{a}} \right)^{2/3}$$

Теплоотдача при обтекании шара несжимаемой жидкостью [3] определяется числом Нуссельта Nu

$$Nu = 2 + 0,03 Pr^{0,33} Re^{0,54} + 0,35 Pr^{0,36} Re^{0,58} \approx 2 + 0,38 Pr^{0,36} Re^{0,58}.$$

При температуре воды 10°C , $Pr = 9,54$ и

$$Nu \approx 2 + 0,856 Re^{0,58} \approx 0,856 \left(\frac{2w \cdot r_n}{\nu} \right)^{0,58}.$$

Выражение для числа Нуссельта с учётом зависимости для скорости всплытия пузырей (при температуре 10°C) примет вид $Nu = 4259 \frac{V_n^{0,268}}{\varepsilon_o^{0,193}}$. В этом слу-

чае коэффициент массопередачи составит $\beta = 2345 \frac{\check{a} \cdot \varepsilon_o^{0,14}}{V_n^{0,065}} \left(\frac{D}{\check{a}} \right)^{2/3}$ м/с, где

размерности \check{a} - м²/с V_n , - м³.

Коэффициент массопередачи содержит параметр, характеризующий размер пузыря газа. Изменение объёма пузыря на шесть порядков от $1 \cdot 10^{-10}$ м³ до $1 \cdot 10^{-4}$ м³ приводит к изменению коэффициента массопередачи в ~3,1 раза; а на три порядка от $3,35 \cdot 10^{-8}$ м³ до $2 \cdot 10^{-5}$ м³ приводит к изменению коэффициента массопередачи в ~1,9 раза. В связи с этим вполне оправдано при определении коэффициента массопередачи задавать средний радиус (средний объём) пузыря газа исходя из геометрических соображений: величине площади поверхности N пузырей конкретной выборки соответствует площадь поверхности того же количества пузырей среднего радиуса \bar{r}_n . Функциональная зависимость для \tilde{S}_n от среднего объёма пузыря \bar{V}_n определяется

из уравнений (1), (2), соотношений $S_n = \xi 4\pi \cdot \bar{r}_n^2$, $V_n = \varepsilon_o \frac{4}{3} \bar{r}_n^3$ и составляет

$$\tilde{S}_n = \frac{1,994 + 2,834 \left[0,2 + 0,8 \exp \left(-\frac{\bar{V}_n}{2 \cdot 10^{-7}} \right) \right]}{\left[0,2 + 0,8 \exp \left(-\frac{\bar{V}_n}{2 \cdot 10^{-7}} \right) \right]^{2/3} \bar{V}_n^{1/3}}.$$

График эквивалентной зависимости \tilde{S}_n от \bar{r}_n представлен на рис. 4.

На основании изложенного можно определить интенсивность потери свободного газа в единице объёма воды газового факела

$$\dot{G} = \beta \cdot \bar{S}_n (c_o - c_\infty), \text{ кг/м}^3\text{с},$$

где c_o , c_∞ - равновесная концентрация газа на стенке пузыря и концентрация растворённого газа в воде за пределами пузыря, кг/м³.

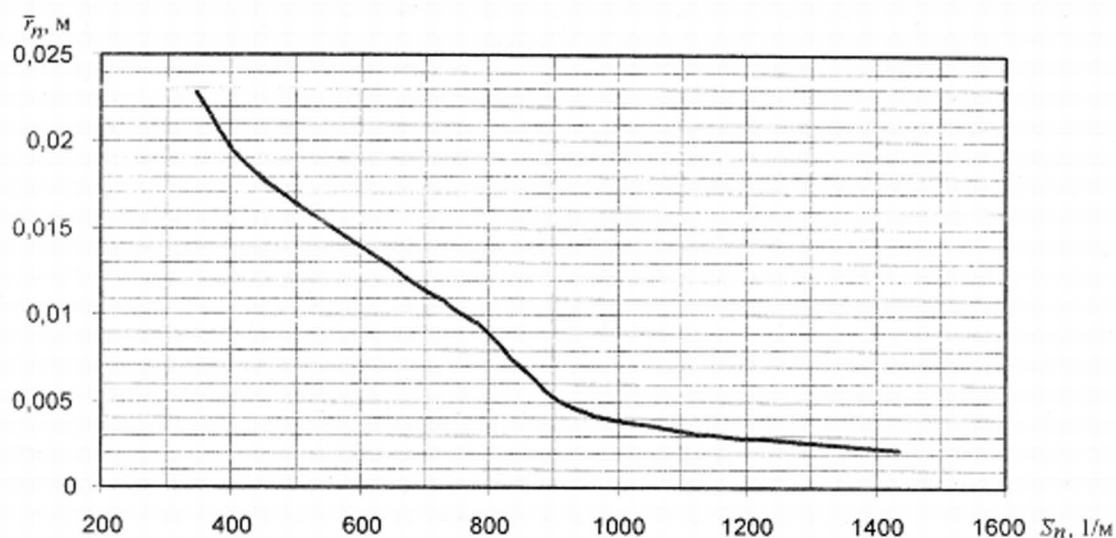


Рис.4. Зависимость между площадью поверхности пузырей, приходящуюся на единицу их объема, и средним радиусом пузырей.

При постоянстве дисперсного состава пузырей газа по высоте факела параметры \bar{c}_v , \bar{w} , \tilde{S}_n и β также остаются постоянными. В опубликованных работах не затрагивается вопрос об изменчивости дисперсного состава пузырей по высоте факела. Выявление изменчивости дисперсного состава пузырей по высоте факела должно явиться предметом дальнейших натурных исследований при решении задачи дистанционного определения газоотдачи сипа.

На рис. 1 представлены гистограммы распределения размеров газовых пузырей у дна [5] – на глубине 108–126 м и в толще воды [1] при глубине положения сипа около 60 м. Дисперсный состав определялся по данным гидроакустического зондирования для газовых струй сипов с низкой газоотдачей. Пузыри над сипом можно считать не загрязненными ПАВ, в толще воды на глубинах ориентировочно менее 150 м – загрязненными. В таблице приведены результаты обработки гистограмм [1, 5] распределения размеров пузырей, а также по скорректированной гистограмме [1], в которой объем пузырей ограничен величиной 20 см³. По материалам [4] пузыри крупнее этого размера неустойчивы и разрушаются. Последняя колонка таблицы может оказаться характерной для пузырей в газовом факеле вдали от сипа, где крупные пузыри могут разрушиться.

Таблица

Осреднённые параметры	Положение пузырей по глубине		
	непосредственно над сипом [4] («чистые» пузыри)	в толще воды [5] («грязные» пузыри)	в газовом факеле («грязные» пузыри)
$\bar{c}_v, \text{с/м}$	4,134	3,186	3,14
$\bar{w}, \text{м/с}$	0,242	0,314	0,318
$\tilde{S}_n, \text{л/м}$	1252	383	528
$\bar{r}, \text{м}$	0,003	0,02	0,0155
$\beta, \text{м/с}$	$4,7 \cdot 10^{-5}$	$2,91 \cdot 10^{-5}$	$3,06 \cdot 10^{-5}$

Как следует из данных таблицы, уменьшение предельного объема пузырей величиной 20 см^3 несущественно повлияло на обобщенные характеристики. Данные, приведенные в таблице, свидетельствуют о существенном различии характеристик всплытия пузырей у сипа для [5] и [1]. По удельному объёму и удельной подъемной силе это различие достигает 30%, по \tilde{S}_n - отношению площади поверхности пузырей к их объёму – различие четырёхкратное, что существенно влияет на массообмен между газовыми пузырями и водой факела. Причину значительного различия гистограмм распределения пузырей в приведенных исследованиях [1, 5] следует искать в строении устья сипа. Наблюдаемое укрупнение пузырей [1] могло произойти в канале до выхода на поверхность при форме устья сипа типа “курильщик”.

Взаимосвязь дисперсного состава пузырей и строения устья сипа может быть выявлена только во время морских экспедиций при изучении поверхности дна в местах выхода газа с привязкой к конкретному району и группе факелов. В цитируемых исследованиях информация о строении дна в месте выхода газа отсутствует.

Выводы.

1. Предложены обобщающие характеристики для обработки материалов гидроакустического зондирования с целью описания процесса формирования внешнего контура подводного газового факела для решения задачи дистанционного определения газоотдачи сипа.

2. Результаты обработки опубликованных материалов гидроакустического зондирования газовых факелов показывают значительный разброс обобщающих характеристик (по удельному объёму пузырей у сипа до 30%, по площади поверхности пузырей до четырёхкратного), что свидетельствует о необходимости изучения во время морских экспедиций структуры устья сипа с привязкой к дисперсному составу пузырей, конкретному району и группе факелов.

1. Егоров В.Н., Поликарпов Г.Г., Гулин М.Б. и др. Влияние струйных метановых газовыделений из дна Чёрного моря на мелкомасштабные процессы вертикального перемешивания вод. Докл. НАН Украины. – 1999. №8. – С. 186 – 190.

2. Кравченко В.Г., Кириченко Е.А. К определению газоотдачи сипа по форме подводного газового факела. Геология и полезные ископаемые Мирового океана. – 2007. №1. – С.

3. Кутателадзе С.С. Основы теории теплообмена. – М.: Атомиздат, 1972. – 416 с.

4. Ладыженский Р.М. Исследование движения воздушного пузырька в воде при высоких значениях Re . ЖПХ. 1954. т. XXVII. №1. – С. 22 – 32.

5. Любицкий А.А. Обратная задача рассеяния звука в интенсивных газовых факелах и модельные оценки пузырькового массопереноса метана по данным акустического зондирования. НАН Украины, Морской гидрофизический институт, Институт геологических наук, Одесский филиал института биологии южных морей. Сборник научных трудов: Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. Севастополь. 2005. 1954. Выпуск 13. – С. 412 – 424.

6. Шервуд Т., Пигфорд Р., Уилки Ч. Массопередача. – М.: Химия, 1982. – 698 с. (русский перевод работы *Thomas K. Sherwood, Robert L. Pigford, Charles R. Wilke. Mass Transfer*, под редакцией чл.- корр. АН СССР Малюсова В.А.).

7. Шнюков Е.Ф., Пасынков А.А., Клещенко С.А. и др. Газовые факелы на дне Чёрного моря. – Национальная академия наук Украины. Отделение морской геологии и осадочного рудообразования ННПМ, Киев. – 1999. – 132 с.

8. Шнюков Е.Ф., Старостенко В.И., Русаков О.М., Кутас Р.И. Глубинная природа газовых факелов западной части Чёрного моря по результатам геофизических исследований. Геология и полезные ископаемые Мирового океана, 2005. № 1. – С. 70 – 82.

Запропоновано осереднені параметри, що характеризують процес спливання газових бульбашок стосовно до задачі оцінки газівіддачі сіпа за геометричною формою підводного газового факела. Наведені залежності дозволяють узагальнити результати гідроакустичного зондування розмірного спектра газових бульбашок.

The averaging parameters, characterizing the process of gas bubbles emersion with reference to the task of estimate of seep gas emission under the geometrical shape of the underwater gas plum are offered. The given dependences allow to summarize the results of hydroacoustics sounding of the dimensional spectrum of gas bubbles.