

УДК 550.82.5

В.Г. Кравченко¹, Е.А. Кириченко²

К ОПРЕДЕЛЕНИЮ ГАЗООТДАЧИ СИПА ПО ФОРМЕ ПОДВОДНОГО ГАЗОВОГО ФАКЕЛА

При описании формы факела наряду с привлечением уравнений гидромеханики жидкости рассмотрен массообмен между пузырями газа и окружающей средой. Газовый шлейф факела задаётся в виде характеризующих его осреднённых параметров, полученных в результате обработки материалов гидроакустического зондирования. Проведен численный эксперимент по оценке газоотдачи одного из факелов северо-западной части Чёрного моря.

Обширными геолого-геофизическими исследованиями газовых факелов сипов, выполненными по проекту “Нефть и газ” в рамках Национальной программы исследований и использования ресурсов Азово-Черноморского бассейна, обнаружены поля газовых факелов в северо-западном секторе Чёрного моря украинских территориальных вод. Здесь уже определено местоположение нескольких сотен газовых факелов различной интенсивности на площади около 2300 км². Анализы собранного газа, выполненные Институтом биологии южных морей (ИнБЮМ) у кавказского побережья [2] определили состав газа: метан 94,7%, этан 4,7%, пропан 0,6%.

Газовые факелы обнаружены на глубинах от 50 до 400 — 600 м. 43% из них расположены на глубинах 50—70 м, примерно столько же — от 70 до 200 м. На глубинах более 200 м находки единичны. Газовые факелы, как правило, имеют конусообразную форму. Условный средний диаметр одиночных газовых факелов у поверхности дна варьирует в пределах от 10 до 40 м [1]. Объёмная концентрация газа в факеле колеблется от $1 \cdot 10^{-3}$ до $1 \cdot 10^{-6}$. Меньшее значение объёмной концентрации представляет предел, ниже которого факел образоваться не может. В этом случае не формируется восходящая струя воды.

По результатам длительного мониторинга выделение газа происходит стабильно, при этом выделяющийся из сипов газ безвозвратно теряется. Для использования подводного газа в экономике Украины необходимы более детальные оценки газоотдачи месторождения, детальная разведка с позиций промышленной эксплуатации. Имеющиеся публикации лишь косвенно касаются хозяйственного использования подводного газа [3, 4].

В настоящей статье предложен метод определения газоотдачи сипа по форме факела. Предпосылкой для такого подхода во-первых является то, что газовые факелы имеют заметную конусность в результате подсоса воды из окружающего пространства и массообмена по свободному газу пузырями с водой. Во-вторых, в настоящее время имеется достаточное количество эхо-

рамм газовых факелов [1]. К тому же, эхолотирование является наиболее доступным способом получения информации о газовых факелах. Разработка математической модели факела позволяет

а) получить величину газотдачи сипа по форме факела для стабильной во времени газотдачи;

б) использовать модель газового факела совместно с инструментальными методами для комплексной оценки величины газотдачи месторождения газа, выделяющегося из недр;

в) использовать результаты моделирования при разработке и определении условий эксплуатации технических средств сбора газа, выделяющегося из сипов.

На рис. 1 представлена типичная эхограмма газового факела [1] северо-западной части Чёрного моря, сип которого расположен на глубине около 117 м. Газовый факел имеет конусообразную форму; гидроакустическая видимость его обеспечивается присутствием пузырей газа. Факел упирается в сезонный температурный клин на глубине около 25 м (эхограмма получена летом). Как свидетельствует эхограмма, разрушение газового факела начинается на глубине около 45 м. Столб факела деформирован подводным течением. Моделирование формы факела предусматривается на участке от дна до начала его разрушения. Несмотря на низкую объёмную концентрацию пузырей газа в факеле, составляющую менее 0,1%, подъёмная сила, развиваемая пузырями в объёме факела, может достигать сотни тонн. Эта подъёмная сила и является движущей силой восходящего потока воды факела.

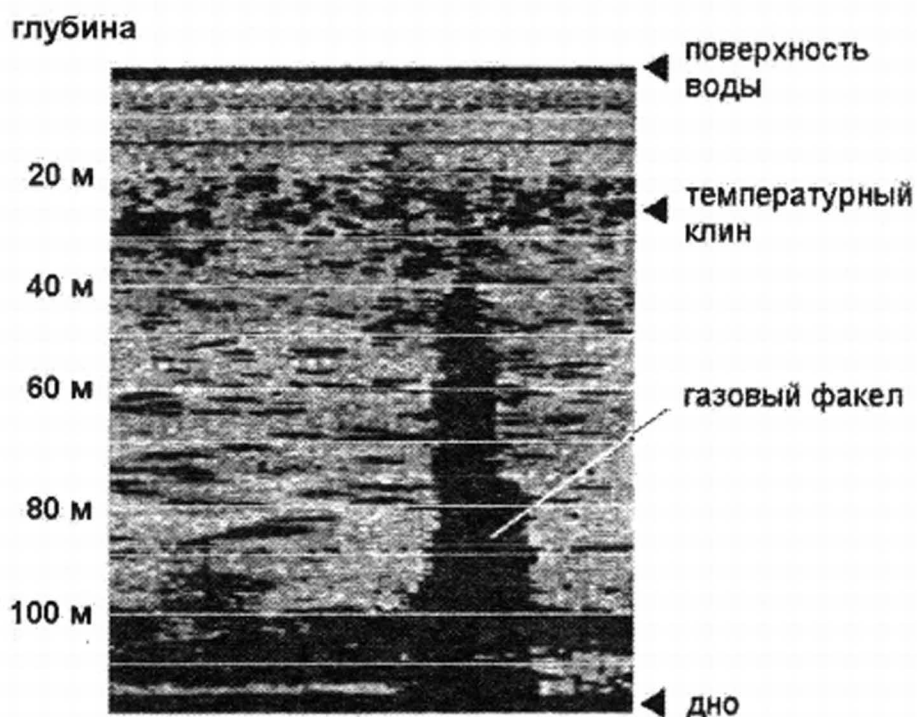


Рис. 1. Эхограмма газового факела

Ввиду в значительной мере неопределённости исходных данных и слабой изученности двухфазных течений такого рода, разработка модели физического процесса ведётся со многими допущениями.

Делается допущение, что величина скорости восходящего потока воды мало изменяется по сечению факела, в связи с чем рассматривается её среднее значение \bar{u}_y . Такое допущение обусловлено тем, что движение восходящего потока воды газового факела происходит в режиме развитой турбулентности, а также ввиду конфузурности поперечного сечения факела. Считается, что коррективы кинетической энергии и количества движения для восходящего потока воды мало отличаются от единицы и не учитываются. Принято, что пузыри газа всплывают в относительном движении с осреднённой скоростью \bar{w} , зависящей от дисперсного состава; последний не изменяется по высоте факела в результате объединения пузырей, вызванного разной скоростью их всплытия (для отдельных размерных групп), и последующего распада при достижении предельного размера. При определении касательных напряжений взаимодействия водяной струи факела с окружающей средой используется формула Никурадзе [4] для коэффициента сопротивления. Применительно к рассматриваемым факелам 90% энергии идёт на разгон воды. Температура воды на рассматриваемом участке газового факела принимается постоянной. Приток воды из сипа считается незначительным и не учитывается.

В основу описания движения жидкости факела положен метод контрольного объёма, который позволяет в достаточно простом виде подойти к решению поставленной задачи [1, 4]. Недостаток и неточность исходных данных и, в определённой мере, приближённость описания компенсируются тем, что модель должна быть откорректирована по результатам инструментальных замеров как геометрических параметров отдельных факелов (гидроакустикой), так и газоотдачи их сипов.

Рассматривается цилиндрический элементарный контрольный объём газового факела радиуса r и высотой dy (рис. 2). Результирующие скорости пузырей газа a - v и воды a - c факела не совпадают как по направлению, так и по величине (рис. 3). В связи с этим наряду с горизонтальной составляющей подсоса воды из окружающего пространства в восходящее движение вовлекается вода в кольцевой прослойке dr^n .

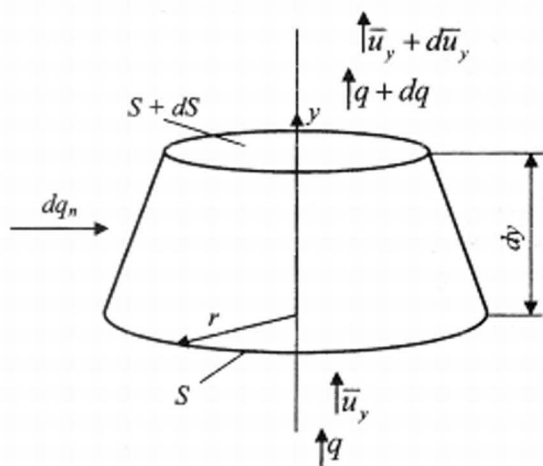


Рис. 2. Элемент газового факела

q — расход восходящего потока воды; q_n — расход бокового подсоса воды; r — радиус факела; S — площадь поперечного сечения факела; dy — высота факела, u — результирующая скорость воды на внешнем контуре факела; \bar{u}_y — скорость восходящего потока воды в факеле; u_r — радиальная составляющая скорости воды на внешнем контуре факела; \bar{w} — осреднённая скорость всплытия пузырей газа

При составлении уравнения энергии сделано допущение, что кинетическая энергия, затраченная на разгон подсасываемой воды на внешнем контуре факела до скорости u_r (скорости подсоса), восстанавливается при торможении струи в центре факела [3]. Первое слагаемое в правой части уравнения энергии должно учитывать и дополнительные затраты энергии с разгоном части внешней среды, захваченной пузырями, так как $\beta \geq a$ (см.

рис. 3). Для учёта затрат энергии на захват параметр $\frac{d\bar{S}}{dy}$ определяется по

“видимому” контуру струи, т.е. по углу a . В связи с этим $\frac{dr}{dy} = \frac{u_r}{\bar{w} + \bar{u}_y}$.

Уравнение количества движения воды в факеле в проекции на ось y

$$S \cdot f \cdot dy = \rho_{\infty} d(q \cdot \bar{u}_y)$$

или

$$f = \frac{\rho_{\infty} \bar{u}_y}{S} \frac{dq}{dy} + \frac{d}{dy}(K).$$

Изменение по высоте факела расхода воды, связанного с подсосом и захватом пузырями газа воды из окружающего пространства, составляет

$$\frac{dq}{dy} = \frac{dq_n}{dy} + \frac{dq_s}{dy}.$$

В свою очередь подсос равен $\frac{dq_n}{dy} = 2\pi \cdot r \cdot u_r$,

захват — $\frac{dq_s}{dy} = 2\pi \cdot r \cdot \bar{u}_y \frac{dr''}{dy}$.

Соотношение приращений радиуса (рис. 3) определяется из соотношения

$$\frac{dr''}{dy} = \frac{dr}{dy} - \frac{dr'}{dy},$$

где $\frac{dr}{dy} = \frac{u_r}{\bar{u}_y}$; $\frac{dr'}{dy} = \frac{u_r}{\bar{w} + \bar{u}_y}$.

Таким образом $\frac{dq}{dy} = \frac{dq_n}{dy} \left(2 + \frac{\bar{u}_y}{\bar{w}} \right) \left(1 + \frac{\bar{u}_y}{\bar{w}} \right)^{-1}$.

В окончательном виде уравнение количества движения потока воды факела в проекции на ось y принимает вид

$$f = \frac{\rho_{\text{ж}} \bar{u}_y}{S} \left(\frac{2 + \frac{\bar{u}_y}{\bar{w}}}{1 + \frac{\bar{u}_y}{\bar{w}}} \right) \frac{dq_n}{dy} + \frac{d}{dy}(K).$$

В проекции на ось r изменение количества движения потока воды равно нулю ввиду отсутствия составляющей импульса силы в проекции на эту ось.

Уравнение неразрывности в данном случае имеет вид

$$S \frac{d\bar{u}_y}{dy} + \bar{u}_y \frac{dS}{dy} = \frac{dq}{dy}.$$

Удельная подъёмная сила χ , являющаяся причиной восходящего движения воды в факеле, в основном определяется объёмной концентрацией пузырей, которая изменяется по высоте факела. Причины изменения:

- массообмен пузырей газа с окружающей водой;
- изменение гидростатического давления по высоте факела;
- изменение скорости потока воды и поперечного сечения факела по высоте.

Газовый поток, поступающий в контрольный объём со скоростью $(\bar{w} + \bar{u}_y)$, характеризуется следующими параметрами:

c_v — объёмной концентрацией пузырей;

\bar{w} — средней по фракционному составу скоростью всплытия пузырей;

в силу принятого допущения $\bar{w} = \text{const}$ по высоте факела; средняя скорость \bar{w} считается одинаковой по сечению факела;

\tilde{S}_n — отношением площади поверхности всех пузырей, находящихся в единице объёма воды, к их объёму;

\bar{r}_n — средним радиусом пузырей, $\bar{r}_n = \bar{r}_n(\tilde{S}_n)$.

В контрольный объём газ поступает с расходом

$$\dot{G} = S(\bar{w} + \bar{u}_y) \cdot c_v \bar{\gamma}_z \gamma_{\text{ж}} h,$$

где $\bar{\gamma}_z$ — удельный вес газа при давлении 1 Па; h — глубина положения контрольного объёма; параметр h отсчитывается не от поверхности воды, а от уровня на 10,33 м выше зеркала воды для учёта нормального атмосферного давления.

На выходе контрольного объёма количество газа уменьшается на величину потерь в результате массообмена с окружающей водой

$$dG = -\beta \cdot \tilde{S}_n c_v (c_o - c_{\infty}) S \cdot dy \cdot dt,$$

где β — коэффициент массоотдачи; c_o , c_{∞} — концентрация газа в пузыре и растворённого газа за пределами пузыря; $c_o = \kappa \cdot \gamma_{\text{ж}} h$, κ — коэффициент

Генри. Как показывают результаты измерений и проведенные оценки, c_∞ близко к фоновым значениям и поэтому опускается. Таким образом

$$\frac{d\dot{G}}{dy} = -\beta \cdot \tilde{S}_n c_v (c_o - c_\infty) S.$$

Изменение состояния газа пузырей (при постоянной температуре) в контрольном объеме описывается уравнением

$$\frac{d\dot{G}}{dy} \frac{1}{\dot{G}} = \frac{d\bar{S}}{dy} + \frac{d\bar{u}_y}{dy} \frac{1}{(\bar{w} + \bar{u}_y)} + \frac{dc_v}{dy} \frac{1}{c_v} - \frac{1}{h}.$$

С учётом массообмена имеем

$$\frac{dc_v}{dy} = c_v \left[\frac{1}{h} - \frac{d\bar{S}}{dy} - \frac{d\bar{u}_y}{dy} \frac{1}{(\bar{w} + \bar{u}_y)} - \frac{\beta \cdot \tilde{S}_n k}{(\bar{w} + \bar{u}_y) \bar{\gamma}_z} \right].$$

Совместное решение уравнений энергии, количества движения, неразрывности и изменения состояния газа в пузырях позволяет определить форму факела.

В качестве исходных данных для определения газоотдачи сипа должны быть заданы параметры, характеризующие газовый поток (c_v — над сипом, \bar{w} , \tilde{S}_n , \bar{r}_n — глубина положения сипа, поперечные размеры газового факела в нескольких сечениях по высоте). Точность приближения оценивается по среднеквадратичной ошибке поперечного размера.

Чтобы проследить за процессами, происходящими в газовом факеле, был смоделирован условный газовый факел, сип которого находится на глубине 300 м. Глубина 300 м была выбрана из тех соображений, что в этих условиях разрушающее влияние температурного клина в меньшей степени влияет на формирование факела на большей части его длины. Контур сипа принят в виде окружности с радиусом 20 м. Газоотдача сипа принята 100 мл/м²с. Удельная подъемная сила пузырей определяется зависимостью $\chi = q_o \bar{c}_v \gamma_{ж}$. Удельная объёмная концентрация \bar{c}_v (представляющая отношение объёмной концентрации пузырей газа в воде к газоотдаче сипа) может находиться в диапазоне 3,18—4,13 с/м. В соответствии с этим удельная подъемная сила пузырей газа у сипа принята равной $c = 4$ Н/м³. Результаты моделирования представлены на рис. 4 и 5. Восходящий поток в факеле разгоняется по закону близкому к экспоненциальному. Высокая интенсивность нарастания скорости у дна является результатом действия повышенной удельной подъемной силы. Наибольшая скорость восходящего потока в рассматриваемом случае может составить около 0,7 м/с. Величина этой скорости в первую очередь зависит от газоотдачи сипа. Наблюдается уменьшение радиуса факела по всей его высоте, причем наиболее интенсивное изменение радиуса происходит у дна. Подсос воды из окружающей среды практически завершается на удалении 100 м от дна. Процессы, происходящие в газовых пузырях, можно проследить по изменению удельной подъемной силы по глубине (рис. 5). Падение удельной подъемной силы в факеле

при приближении к поверхности воды, наблюдаемое на глубине, объясняется повышенным массообменом пузырей с окружающей средой в силу высокого гидростатического давления. В диапазоне глубин 200—50 м величина удельной подъемной силы стабилизируется в результате более интенсивного расширения пузырей в связи с падением гидростатического давления. Непосредственно у поверхности воды расширение пузырей превалирует над потерями газа в результате массообмена. При расположении сипа на меньших глубинах провал удельной подъемной силы по указанным причинам уменьшается.

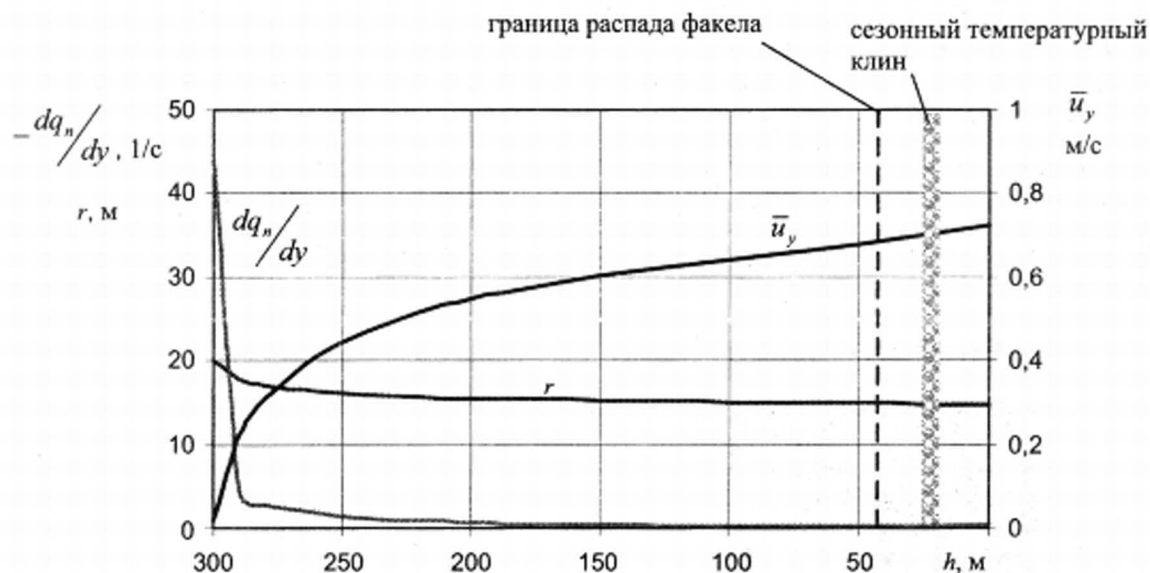


Рис. 4. Изменение по глубине радиуса факела r , градиента подсоса окружающей воды в факеле dq_n/dy и скорости восходящего потока воды в факеле \bar{u}_y

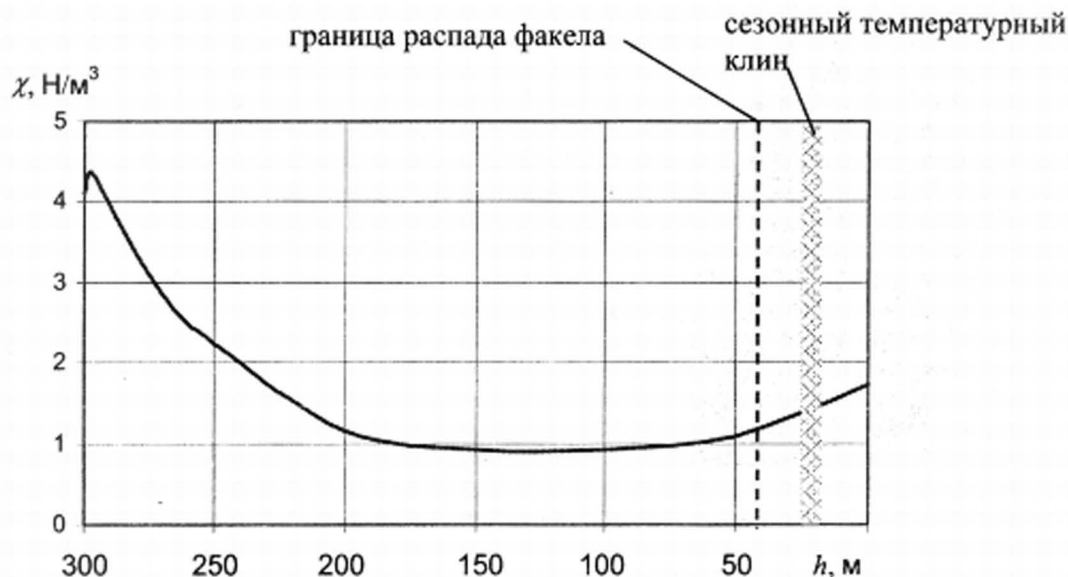


Рис. 5. Изменение удельной подъемной силы пузырей газа по высоте факела

В качестве примера была оценена газоотдача сипа, эхограмма которого приведена на рис. 6 [1]. Факел этого сипа находится на глубине 58 м. Разрушение факела происходит на глубине около 27 м. У основания факел имеет

радиус около 6,3 м, на уровне начала разрушения — около 4,3 м. Промеры радиусов по высоте факела дают контур, близкий к усечённому конусу. Определить изменение радиуса непосредственно у дна по эхограмме не представляется возможным. Газоотдача определялась по лучшему приближению расчётного контура факела к «видимому» по результатам обработки эхограммы. Результаты моделирования показаны на рис. 6. Расчётный радиус сипа составляет около 6,5 м, удельная подъёмная сила газовых пузырей у дна, которая обеспечивает заданный контур, составляет 14 Н/м^3 . Газоотдача сипа находится на уровне 330—430 $\text{мл/м}^2\text{с}$, что эквивалентно объёму газа, выделяемому сипом при нормальном давлении до 10 млн. нм^3 в год. В работе [7] приведены сведения по сипам, количество которых приближается к двумста. В примере рассмотрен один из малых сипов. Как свидетельствует работа [7], размеры сипов достигают в поперечнике десятков метров, отдельные газовыделения представлены целыми полями. Даже достаточно приближённая оценка газоотдачи свидетельствует о возможных перспективах сипов в качестве альтернативного источника газа промышленного значения.

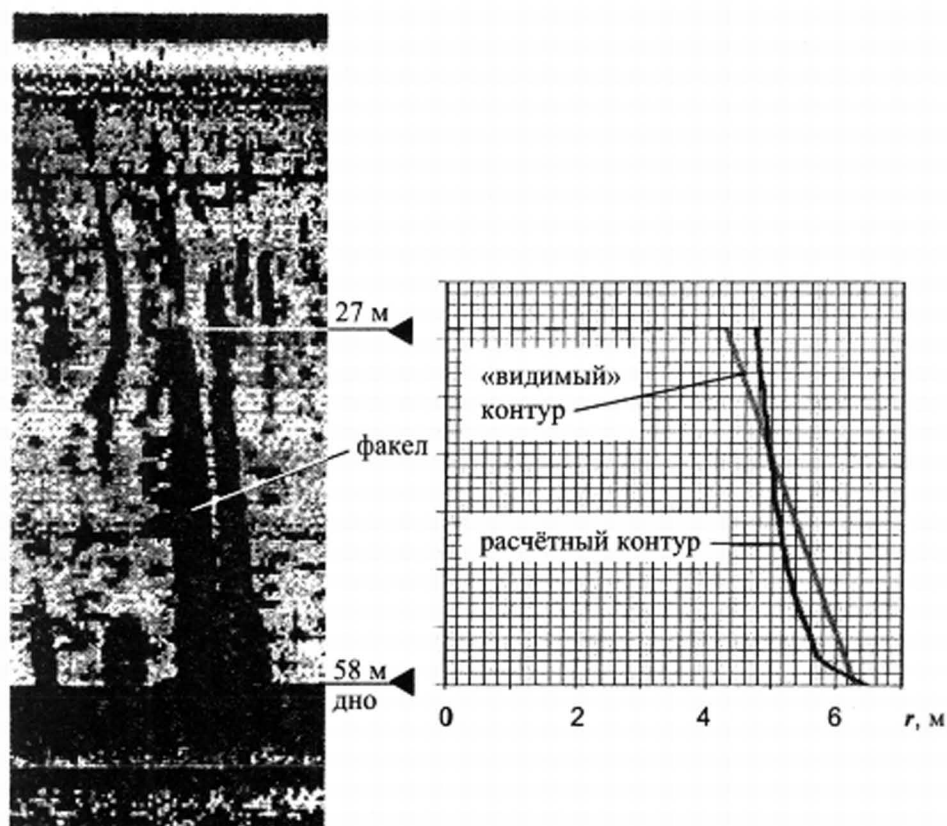


Рис. 6. Расчётный контур газового факела

Выводы

1. Предложенный метод определения производительности по газу сипа по форме подводного газового факела, базирующийся на результатах гидроакустического зондирования, доступен в реализации.

2. Поскольку определение фактической газоотдачи сипов до настоящего времени не проводилось, для выяснения промышленной значимости месторождения в северо-западной части Чёрного моря целесообразно провести апробации предложенного метода с проведением натурных работ.

1. Дж. Дейли. Механика жидкости (перевод с английского).—М.: Энергия, 1971 г.—480 с. (русский перевод работы *James W. Daily, Donald R.F. Harleman. Fluid Dynamics. Ontario, 1966*).

2. 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. Доклады НАН Украины. -1999 г., №8, -С. 186 — 190.

3. Идельчик И.Е. Аэрогидродинамика технологических аппаратов (Подвод, отвод и распределение потока по сечению аппаратов).—М.: Машиностроение, 1983 г.—352 с.

4. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа.—М.: Наука, 1973 г.—848 с.

5. Любичкий 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, выпуск 13, 2005 г. -С. 412 — 424.

6. Ткешелашвили Г.И., Егоров В.Н. Мествиришвили Ш.А. и др. Метановые выделения со дна Чёрного моря в приустьевой зоне реки Супса у побережья Грузии. Геохимия, 1997, №3.

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

При описанні форми факелу, поряд із залученням рівнянь гідромеханіки рідини, розглянуто масообмін між бульбашками газу і навколишнім середовищем. Газовий шлейф факелу задається у вигляді осереднених параметрів, що його характеризують, і які отримані в результаті обробки матеріалів гідроакустичного зондування. Наведено результати чисельного експерименту з оцінки газовіддачі одного з факелів північно-західної частини Чорного моря.

When description the plume shape together with engaging of hydromechanics equations the mass transfer between gas-bubbles and environment is reviewed. The gas train of the plume is set as describing its averaging parameters obtained as a result of processing of hydroacoustics sounding materials. There are given the results of the numerical experiment according to gas emission estimate of one of seeps in the north-west part of the Black sea.