

УДК 550.82.5

В.Г.Кравченко<sup>1</sup>

## МЕХАНИЗМ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ПОДВОДНЫХ ГАЗОВЫХ ФАКЕЛОВ ЧЁРНОГО МОРЯ

*Рассмотрен механизм фильтрации подземной воды с газом через слой водопроницаемой несвязной породы, подстилающей дно, для выявления закономерностей образования как стабильных, так и пульсирующих подводных газовых факелов в северо-восточном регионе Чёрного моря. Проведенный анализ механизма фильтрации позволяет уточнить направления исследований донных источников газа во время морских экспедиций и при макетном моделировании с целью разработки методов определения величины донных газовых потоков.*

Донное газовыделение в Чёрном море известно давно. Однако целенаправленное изучение этого явления природы началось в конце XX столетия. Этому способствовало использование в практике морских исследований гидроакустических средств. Наиболее полно обследован по поводу донного газовыделения северо-западный регион моря вблизи полуострова Крым. Основные участки донного газовыделения локализованы на площади по долготе 130 км, по широте 30 км. На этом участке проведены предварительные геолого-геофизические и поисковые сейсморазведочные работы, позволившие выявить сотни объектов донного газовыделения. Результаты этих работ изложены в монографиях [10, 12]. Основным компонентом выделяемого со дна газа по предварительным данным является метан.

Для решения задачи по определению величины донных газовых потоков необходимо наряду с геологической природой объектов донного газовыделения выяснить и механизм их функционирования. При этом имеются в виду потоки газа, поступающие по разломам в земной коре на поверхность дна, причем газовые потоки в толще воды в виде факелов являются составной их частью. Основная масса факелов сосредоточена на глубине около 70 м. Газовые факелы, состоящие из газовых пузырей и увлекаемой ими в восходящем потоке морской воды, являются внешним проявлением донного газовыделения. Факел образуется в результате интенсивного потока свободного газа с поверхности дна, локализованного своеобразным кратером — сипом [2]. Газовые факелы по форме можно подразделить на стабильные, пульсирующие и газовые поля. Диаметры сипов в северо-восточном регионе Чёрного моря составляют в среднем от 10 до 40 м [12].

Проявление сконцентрированного в виде сипов донного газовыделения связывается с зонами общего смятия и дробления подстилающих

©В.Г.Кравченко

<sup>1</sup>ОМГОР ННПМ НАН Украины

пород [12, 1]. Одним из основных положений гидрогеологии является проверенный практикой факт, что подземная вода выступает в роли рабочего тела при переносе углеводородов [3]. Об участии подземной воды в транспортировке газа свидетельствуют карбонатные постройки в местах выхода газа, наблюдаемые, в основном, на глубинах мене 50 м [10]. Условия образования субмаринных источников близки к условиям образования газовых факелов: наличие нарушений целостности залегания пород является предпосылкой для выхода подземных вод на поверхность дна [11]. Рассмотрение подземной воды как первопричины образования сипов позволяет с одной стороны подойти к наиболее полному учёту поступления газа на поверхность дна, с другой — наметить пути инструментального обеспечения определения донной газоотдачи и, в перспективе, решения задачи сбора донного газа в промышленных масштабах.

Для анализа механизма поступления газа вместе с подземной водой на поверхность дна рассматривается следующая схема. По каналу в разломе водоупорной породы подземная вода + газ (метан) движутся вверх к поверхности дна. Встретив на завершающем этапе пути придонный слой водопроницаемой несвязной породы, подземная вода и свободный газ фильтруются через этот слой. Принимая во внимание, что диаметр газовых факелов может составлять 10÷40÷100 м [12, 2], мощность слоя водопроницаемой несвязной породы должна иметь такого же порядка величину. При фильтрации в обычном режиме не может произойти концентрированного выделения газа со дна в виде сипа. Распределение выделения газа по поверхности дна в таком случае имело бы плавный характер с максимумом над источником и стремлением к нулю на периферии. Для формирования на поверхности дна ограниченной области интенсивного газовыделения в виде сипа необходимо, чтобы грунт под сипом перешёл в псевдооживленное состояние, облегчающее перемещение свободного газа (вместе с подземной водой) в вертикальном направлении. В зоне псевдооживления частицы грунта находятся во взвешенном состоянии [6]. Термин псевдооживление используется в химической технологии и строительстве. Для зоны псевдооживления должна быть характерной суффозия — вымывание мелких частиц, сопровождающееся увеличением коэффициента фильтрации. Для водопроницаемой несвязной породы, составляющей верхний слой донных осадков Чёрного моря, коэффициент фильтрации имеет порядок  $1 \cdot 10^{-5} \div 1 \cdot 10^{-4}$  м/с [5]. В зоне псевдооживления следует ожидать, что коэффициент фильтрации на порядок выше.

Для решения задачи фильтрации подземной воды и свободного газа через слой водопроницаемой несвязной породы с получением оценочных аналитических зависимостей применена линейная модель процесса. На глубине  $h$  от дна на поверхности водоупора под массивом водопроницаемой несвязной породы находится источник (рис. 1). Сверху массив водопроницаемой несвязной породы ограничен поверхностью дна.

Принимая во внимание, что динамическая вязкость воды на два порядка выше, чем у метана ( $\approx 1 \cdot 10^{-3}$  кг/м·с и  $\approx 1 \cdot 10^{-5}$  кг/м·с соответствен-

но), объёмный фильтрационный поток воды и свободного газа через единицу площади поверхности можно представить в виде

$$q \approx (1+\lambda) \frac{k_w}{g \cdot \rho_w} \cdot \frac{dp}{dn} = K \frac{dp}{dn},$$

где  $(1+\lambda)k_w/g \cdot \rho_w = K$ ;  $\lambda = Q_{c2}/Q_w$  — соотношение объёмных расходов свободного газа и подземной воды, проходящих через поверхность дна;  $K_w$  — коэффициент фильтрации по воде;  $g$  — ускорение земного тяготения;  $\rho_w$  — плотность подземной воды;  $n$  — нормаль к изобарической поверхности фильтрации.

Для решения задачи (в линейной постановке) применён метод суперпозиции полей (давлений). Источник представлен в виде полусферы радиуса  $R_0$ . Давление фильтрации на поверхности полусферы составляет  $p_1$ , на поверхности дна  $p_0$ . Зона псевдооживления на поверхности дна имеет радиус  $x_c$ .

Поле давлений фильтрации в плоскости  $x - y$  определяется уравнением

$$\frac{p-p_0}{p_1-p_0} = R_0 \left[ \left( x^2 + (h-y)^2 \right)^{-0,5} - \frac{1}{2} \left( x^2 + (h+y)^2 \right)^{-0,5} - \frac{1}{2} \left( x^2 + (3h-y)^2 \right)^{-0,5} - \frac{1}{3} h^{-1} \right].$$

Положение осей системы координат показано на рис. 1.

При этом градиент давления в вертикальном направлении составит

$$\frac{dp}{dy} = (p_1 - p_0) R_0 \left\{ \frac{h-y}{\left[ x^2 + (h-y)^2 \right]^{3/2}} + \frac{h+y}{2 \left[ x^2 + (h+y)^2 \right]^{3/2}} - \frac{3h-y}{2 \left[ x^2 + (3h-y)^2 \right]^{3/2}} \right\}.$$

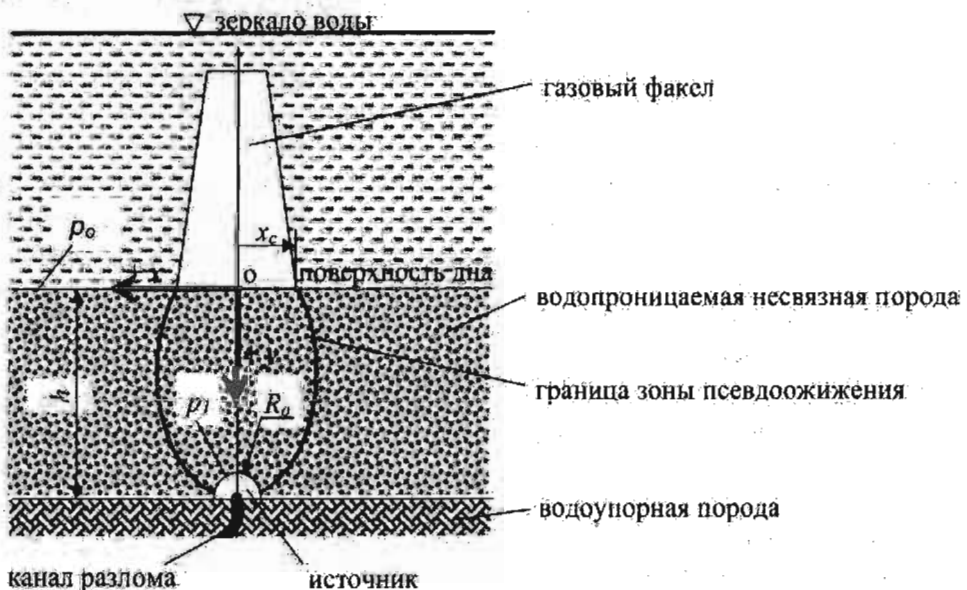


Рис. 1. Схема фильтрации подземной воды и свободного газа через ограниченный массив водопроницаемой несвязной породы

В результате решения задачи расход воды и свободного газа через источник в режиме фильтрации при  $R_0 \ll h$  равен

$$Q_u \approx 4\pi \cdot K \cdot R_0 (p_1 - p_0).$$

Определить расход через источник непосредственно из этого уравнения не представляется возможным так как, во первых, неизвестны радиус источника и фильтрационное давление в нём, во вторых, уравнение не учитывает наличие зоны псевдооживления, которая заканчивается на поверхности дна сипом. Наличие области псевдооживления делает задачу фильтрации существенно нелинейной.

Расход через сип в режиме псевдооживления определяется уравнением

$$Q_c^* = \int_{S_c} K \frac{dp_{kp}}{dy} dS, \text{ где } S_c \text{ — площадь сипа.}$$

Критический градиент давления фильтрации в вертикальном направлении [9], соответствующий режиму псевдооживления, слабо зависит от расхода [6]

$$\frac{dp_{kp}}{dy} = \frac{\gamma_s - \gamma}{(1+e)}, \text{ где } e \text{ — коэффициент пористости грунта; } \gamma_s, \gamma \text{ — удельные веса частиц грунта и среды (подземной воды со свободным газом) в псевдооживленном слое; } \gamma = \frac{\gamma_w}{1+\lambda}; \gamma_w \text{ — удельный вес подземной воды.}$$

Тогда расход через сип в режиме псевдооживления составит

$$Q_c^* = \pi \cdot K \cdot x_c^2 \frac{\gamma_s - \gamma}{(1+e)}$$

Конечной целью решения задачи фильтрации является определение потока через источник. Для определения связи между потоком через сип и источник в режиме псевдооживления используется следующий искусственный приём. Определяется отношение расхода через условную поверхность дна, которую охватывает сип, к расходу через источник при “чистой” фильтрации (отсутствии участков массива с псевдооживлением). Полученное значение считается первым приближением фактического отношения расходов.

Расход через условную поверхность сипа при “чистой” фильтрации составляет

$$Q_c = \int_0^{x_c} K \left( \frac{dp}{dy} \right)_{y=0} \times 2\pi \cdot x \cdot dx = \pi \cdot K (p_1 - p_0) R_0 \left( 4 - 3h(x_c^2 + h^2)^{-1/2} - 3h(x_c^2 + 9h^2)^{-1/2} \right)$$

Тогда первое приближение отношения расходов через сип и источник в режиме псевдооживления равно

$$\alpha_1 = \frac{Q_c^*}{Q_u^*} \approx 2 \left( 1 - \frac{3h}{4} (x_c^2 + h^2)^{-1/2} - \frac{3h}{4} (x_c^2 + 9h^2)^{-1/2} \right).$$

В связи с образованием зоны псевдооживления и протеканием процесса суффозии коэффициент фильтрации в этой зоне возрастает по сравнению с остальной областью. Возрастание коэффициента фильтрации характеризуется отношением

$\beta = K^*/K$ , где  $K^*$  — новое значение параметра, характеризующего фильтрационную способность грунта в зоне псевдооживления.

Увеличение коэффициента фильтрации через зону псевдооживления приводит к изменению соотношения расходов через сип и остальную область фильтрации. Это изменение приближённо представляется в следующем виде

$$\alpha_2 \approx \frac{Q_c^*}{Q_u^{**}} = \frac{\alpha_1 \cdot \beta \cdot Q_u^*}{(1 - \alpha_1) \cdot Q_u^* + \alpha_1 \cdot \beta \cdot Q_u^*} = \frac{\alpha_1 \cdot \beta}{1 + \alpha_1(\beta - 1)}$$

Более точное значение коэффициента  $\alpha$  может быть установлено по результатам исследований на макете.

Суммарный поток газа через источник можно представить как

$$\begin{aligned} G_z &= G_\phi + G_{c.cв} + G_{c.p} = \frac{Q_u^{**}}{1 + \lambda} (1 - \alpha_2) \cdot \left( \frac{\lambda \cdot \bar{\gamma}_z \cdot p_u}{g} + \kappa_u \cdot p_u \right) + \\ &+ \frac{\alpha_2 \cdot \lambda \cdot Q_u^{**} \cdot \bar{\gamma}_z \cdot p_\partial}{(1 + \lambda)g} + \frac{\alpha_2 \cdot Q_u^{**}}{1 + \lambda} \cdot \kappa_\partial \cdot p_\partial \approx \\ &\approx \frac{Q_u^{**}}{1 + \lambda} \left[ p_u - \alpha_2 (p_u - p_\partial) \right] \cdot \left( \frac{\lambda \cdot \bar{\gamma}_z}{g} + \kappa_\partial \right) \end{aligned}$$

где  $G_\phi$  — массовый расход газа, фильтрующегося через грунт вне сипа;  $G_{c.cв}$  — массовый расход свободного газа, проходящего через поверхность сипа;  $G_{c.p}$  — массовый расход растворённого в воде газа, проходящего через поверхность сипа;  $k_u, k_\partial$  — коэффициенты Генри (по метану) с учётом солёности подземной воды [7] при температурах источника и на поверхности дна;  $p_u, p_\partial$  — абсолютное давление в источнике и на поверхности дна;  $\bar{\gamma}_z$  — отношение удельного веса газа к давлению при температуре дна.

Соотношение объёмов свободного газа и подземной воды, участвующих в фильтрационном процессе на участке источник — дно, составляет

$$\lambda \approx \frac{c_k - \kappa_\partial \cdot p_\partial}{\bar{\gamma}_z p_\partial} g, \text{ где } c_k \text{ — массовая концентрация газа (свободного и}$$

растворённого) в воде источника,  $c_k = \frac{G_z(1 + \lambda)}{Q_u^{**}}$ .

Таким образом, при известных фильтрационных свойствах водопроницаемой несвязной породы (как в зоне сипа, так и за его пределами) и её мощности, составе газа, солёности подземной воды и размерах сипа можно приближённо оценить величину потока подземной воды и свободного газа через источник, образующий стабильный газовый факел.

Данные по объёмному расходу газа с единицы поверхности сипа  $q_0$  (при температуре и давлении у дна), которые могут быть получены инструментальными методами или определены по форме факела [4], позволяют откорректировать параметр  $K$ , характеризующий фильтрационную способность грунта в зоне псевдооживления

$$q_0 = K \frac{[(1+\lambda)\gamma_s - \gamma]}{(1+e)(1+\lambda)^2}.$$

В качестве своеобразной характеристики распределения потоков газа на выходе источника может служить отношение массового расхода газа, выделяемого в виде свободного с поверхности сипа, к суммарному массовому расходу газа, поступающего по каналу разлома  $\varepsilon = \frac{G_{с.с.в.}}{G_2}$ .

Кроме подземных источников со стабильными газовыми факелами, существуют источники с пульсирующими факелами, которые составляют около 53% от общего числа выявленных объектов донного газовыделения (рис. 2).

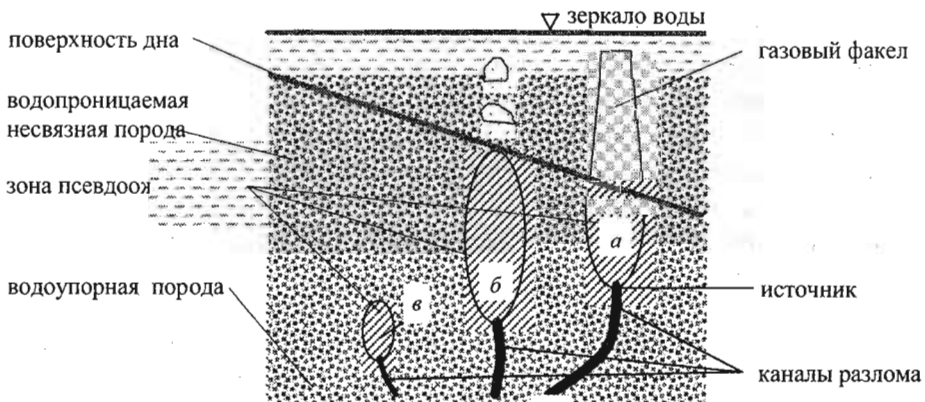


Рис. 2. Разновидности подземных источников: а - со стабильным газовым факелом; б - с пульсирующим газовым факелом; в - скрытый источник.

Такое внешнее проявление функционирования подземного источника можно объяснить его недостаточной мощностью и заглублением. В таком случае зона псевдооживления не выходит на поверхность дна. Повышенная фильтрационная способность внутри зоны псевдооживления не может в полной мере реализоваться из-за того, что сверху эта зона закупорена донными осадками. Накапливающийся в верхней части свободный газ с водой периодически прорывается на поверхность дна.

Для решения этой задачи, в целом нелинейной из-за наличия зоны псевдооживления, с получением ориентировочных значений потока подземной воды и свободного газа используется линейный подход. Принимается, что у пульсирующего факела зона псевдооживления достигает точки 0 с координатами  $x = 0, y = 0$ . Градиент давления в этой точке будет

$$\left. \frac{dp}{dy} \right|_0 = \frac{26}{18} (p_1 - p_0) \frac{R_0}{h^2}.$$

и он должен быть равен критическому значению. В таком случае

$$(p_1 - p_0) \cdot R_0 = \frac{18}{26} \cdot \frac{(\gamma_s - \gamma) \cdot h^2}{(1+e)}$$

Подставляя это выражение в уравнение для расхода  $Q_u$ , получаем ожидаемый расход подземной воды и свободного газа через источник для случая пульсирующего газового факела

$$Q_{un} \approx \frac{18}{13} \pi \cdot K \cdot \frac{(\gamma_s - \gamma) \cdot h^2}{(1+e)} = 1,38 \cdot \pi \cdot K \cdot \frac{(\gamma_s - \gamma) \cdot h^2}{(1+e)}$$

Более точные закономерности для потока пульсирующего газового факела могут быть получены по результатам макетного моделирования механизма его функционирования.

Применительно к пульсирующему газовому факелу массовый поток газа (вне зависимости от фазового состояния) равен

$$G_{zn} = c_k \cdot \frac{Q_{un}}{1+\lambda}$$

Значения массовой концентрации газа в подземной воде  $c_k$  и параметра  $\lambda$  берутся по результатам исследования источников со стабильными газовыми факелами. Поскольку эти параметры определяются геологическими условиями в конкретном районе, то можно предположить, что они не зависят от внешнего проявления донного газовыделения.

Велика вероятность существования разновидности подземных источников — скрытых источников, внешние проявления которых над поверхностью дна с помощью существующих технических средств обнаружить не удаётся (см. рис. 2). Причиной существования таких источников является их недостаточная мощность для существующего заглубления.

На рис. 3 показана схема газового поля. Образование газового поля является результатом выхода подземной воды со свободным газом из многочисленных разломов в водоупорной породе. Близкое расположение каналов выхода создаёт в водопроницаемой несвязной породе сплошную зону псевдооживления. В результате этого на поверхности дна возникает обширная область интенсивного газовыделения, простирающаяся на сотни метров. Всплывающие пузыри газа увлекают в восходящий поток морскую воду. При значительной величине отношения ширины поля к глубине моря возникает неустойчивость, порождающая конвективные токи [8]. Сплошной поток пузырей газа с поверхности дна разбивается на отдельные факелы, которые формируются над шестигранными ячейками поля. Каждый факел является элементом гексагональной структуры газового поля с восходящим в центре и нисходящим по краям потоком морской воды. Газовое поле представляет собой сплошной лес факелов, что наблюдается на эхограммах [12]. Непрерывная циркуляция воды внутри поля приводит к росту концентрации растворённого газа в воде, что является одной из причин достижения вершинами газовых факелов поверхности воды. Принимая во внимание сложный механизм образования факелов поля и учитывая, что газовые поля составляют около 1% от общего числа

выявленных объектов донного газовыделения, определение их газоотдачи целесообразно производить инструментальными методами с измерением потока газа с единицы площади дна и оконтуриванием поля.

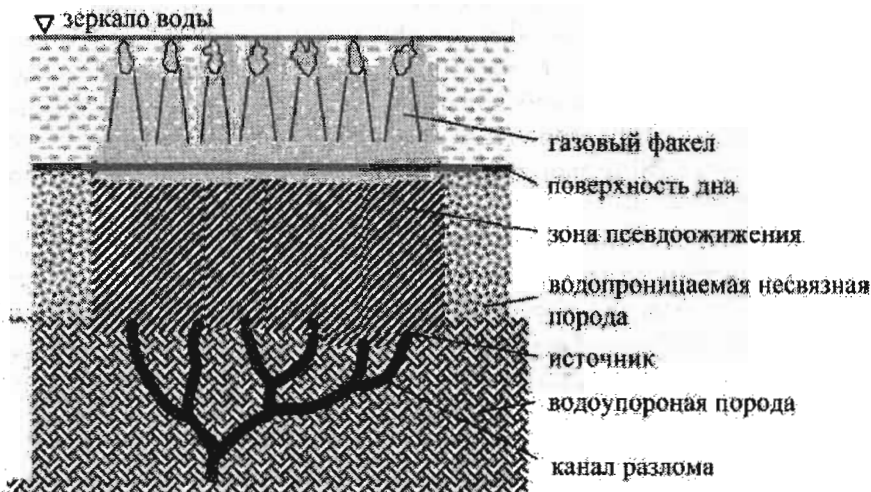


Рис. 3. Схема разреза газового поля

В качестве примера проведена оценка величины газоотдачи подземных источников со стабильным и пульсирующим газовыми факелами.

**Источник со стабильным газовым факелом.**

Исходные данные: глубина положения источника относительно дна —  $h = 50$  м; радиус сипа —  $x_c = 15$  м; глубина моря — 70 м; коэффициент фильтрации воды в массиве (для мелкого песка) —  $k = 5 \cdot 10^{-5}$  м/с; отношение коэффициентов фильтрации воды в псевдооживленном слое и массиве — 10; удельный вес частиц породы  $\gamma_s = 2,6 \cdot 10^4$  Н/м<sup>3</sup>; газ — метан 100%; коэффициент Генри по метану для диапазона глубин до 120 м при температуре +10°C и удельном весе подземной воды  $\gamma_w \approx 1,13 \cdot 10^4$  Н/м<sup>3</sup> —  $k \approx 1,5 \cdot 10^{-7}$  кг/м<sup>3</sup>·Па; отношение удельного веса метана при температуре +10°C к давлению  $\bar{\gamma}_{2\partial} = 6,7 \cdot 10^{-5}$  — 1/м; коэффициент пористости грунта в зоне псевдооживления  $e = 0,7$ .

Результат: отношение расхода (подземной воды и свободного газа) через площадь дна, ограниченную радиусом  $x_c$ , к расходу через источник при “чистой” фильтрации  $\alpha_1 \approx 6,57 \cdot 10^{-2}$ ; отношение расхода через площадь сипа к расходу через источник  $\alpha_2 \approx 0,41$ ; расход подземной воды и свободного газа через сип  $Q_c^* = 0,421$  м<sup>3</sup>/с; расход подземной воды и свободного газа через источник  $Q_u^{**} \approx 1,02$  м<sup>3</sup>/с; поток массы свободного газа сипа  $G_{c.св} = 0,53$  кг/с; расход массы газа (свободного и растворённого) из источника  $G_z = 1,89$  кг/с; массовая концентрация растворённого газа в воде первичного источника равна  $c_k = 2,4$  кг/м<sup>3</sup>; объёмный расход газа с единицы поверхности сипа при температуре и давлении у дна  $q_0 = 4,6 \cdot 10^{-4}$  м<sup>3</sup>/м<sup>2</sup>·с; доля массы газа, выделяемого в виде свободного с поверхности сипа от суммарного его количества, поступающего по каналу разлома, равна  $\varepsilon = 0,29$ ; соотношение объёмов свободного газа и подземной воды, участвующих в фильтрационном процессе  $\lambda = 0,3$ ; годовая



газоотдача источника по газу  $8,9 \cdot 10^7$  нм<sup>3</sup>/год (нм<sup>3</sup> соответствует одному м<sup>3</sup> газа, приведенному к нормальным условиям).

#### Источник с пульсирующим газовым факелом.

Исходные данные: глубина положения источника относительно дна —  $h = 50$  м; глубина моря —  $70$  м; коэффициент фильтрации воды в массиве (для мелкого песка) —  $k = 5 \cdot 10^{-5}$  м/с; газ — метан 100%; удельный вес фильтрующейся подземной воды  $\gamma_w \approx 1,13 \cdot 10^4$  Н/м<sup>3</sup>; коэффициент пористости грунта  $e = 0,6$ ; массовая концентрация газа в воде источника равна  $c_k = 2,4$  кг/м<sup>3</sup> (принята по результатам расчёта для сипа с постоянной газоотдачей).

Результат: ожидаемый расход подземной воды и свободного газа через источник  $Q_u = 0,69$  м<sup>3</sup>/с; поступление газа с подземной водой из источника  $G_z = 1,65$  кг/с; годовая газоотдача источника по газу  $7,7 \cdot 10^7$  нм<sup>3</sup>/год.

По результатам проведенного анализа можно выявить основные параметры, которые определяют величину газоотдачи донных источников газа, образующих стабильные и пульсирующие газовые факелы. К ним относятся:

- мощность покрывающих источник водопроницаемых несвязных пород
- диаметр сипа;
- состав газа, поступающего на поверхность дна;
- солёность подземной воды;
- характеристики грунта по дисперсному составу, пористости, фильтрационной способности и удельному весу частиц, как в области относящей к сипу, так и в массиве за пределами сипа.

Для определения газоотдачи донных источников с пульсирующими факелами необходимо проведение детальных исследований источников со стабильными факелами. Это в первую очередь относится к определению косвенными методами массовой концентрации газа в воде источника с набором статистики для всего района распространения очагов донного газовыделения. Данные по газоотдаче сипов, полученные как инструментальными методами во время морских экспедиций, так и расчётными методами по форме факела, апробированными на материалах натуральных измерений, позволят откорректировать сведения по фильтрационной способности грунта сипов. Неоценимую помощь в выявлении особенностей механизма функционирования донного источника может оказать макетное моделирование. Макетное моделирование позволит решить задачи, которые невозможно решить во время морских экспедиций. Это в первую очередь касается установления фактических закономерностей между потоком через источник и глубиной его положения для пульсирующего факела, между расходом через сип и источником со стабильным газовым факелом, выявления механизма фильтрации подземной воды и свободного газа через водопроницаемую несвязную породу. Макетное моделирование также может оказать помощь в выборе способа добычи природного газа таких необычных источников.

По состоянию на 1999 г. в северо-западном регионе Чёрного моря было выявлено более 300 объектов донного газовыделения [12]. В настоя-

щее время количество выявленных объектов донного газовыделения существенно возросло. Полученные оценочные величины газоотдачи единичных донных источников дают основание для детального изучения этого явления природы.

1. Богданов Ю.А., Коболев В.П., Русаков О.М. и др. Геополаритонное зондирование газоносных структур северо-западного шельфа Чёрного моря // Геология и полезные ископаемые Мирового океана. — 2007. №1. — С. 77-87.
2. Димитров Л.И., Дончева В.Г. Признаки газоносности морского ложа на юге болгарского сектора Чёрного моря // Труды института океанологии (Болгария). — 1998. №2. С. 77 — 89.
3. Корценштейн В.Н. Методика гидрогеологических исследований нефтегазоносных районов. — М.: Недра, 1976, 309 с.
4. Кравченко В.Г., Кириченко Е.А. К определению газоотдачи сипа по форме подводного газового факела // Геология и полезные ископаемые Мирового океана. — 2007. №1. — С. 110-119.
5. Кухарь В.Ю., Зиборов А.П. О необходимости научного обеспечения перевода на большие глубины добычных работ на месторождениях строительных материалов шельфа Чёрного моря // Геология и полезные ископаемые Мирового океана. — 2007. №1. — С. 120-130.
6. Минц Д.М. О гидравлическом сопротивлении взвешенного в потоке зернистого слоя // Доклады АН СССР. — 1952. — Том LXXXIII, №4, С. 541-544.
7. Намиот А.Ю., Бондарева М.М. Растворимость газов в воде под давлением. — М.: Гостоптехиздат, 1963, 147 с.
8. Заславский Г.М., Сагдеев Р.З. Введение в нелинейную физику. От маятника до турбулентности и хаоса. — М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1988, 368 с.
9. Справочник по инженерной геологии. Под ред. Чуринова М.В. — М.: Недра, 1974, 408 с.
10. Шнюков Е.Ф., Зиборов А.П. Минеральные богатства Чёрного моря. — Киев: 2004, 279 с.
11. Шнюков Е.Ф., Иноземцев Ю.И., Лялько В.И. и др. Геология шельфа УССР. Твёрдые полезные ископаемые. (Глава 4. Дублянский В.Н., Лялько В.И., Подорван В.Н. и др. Подземный сток в акватории Чёрного моря) — Киев: Наукова думка, 1983, 200 с.
12. Шнюков Е.Ф., Пасынков А.А., Клещенко С.А. и др. Газовые факелы на дне Чёрного моря. — Киев: НАН Украины, ОМГОР ННПМ, 1999, 132 с.

Розглянуто механізм фільтрації підземної води з газом через шар водопрониклої незв'язної породи, що підстелює дно, для виявлення закономірностей утворення як стабільних, так і пульсуючих підводних газових факелів у північно-східному регіоні Чорного моря. Проведений аналіз механізму фільтрації дозволяє уточнити напрямки досліджень донних джерел газу під час морських експедицій і при макетному моделюванні з метою розробки методів визначення величини донних газових потоків.

The mechanism of a filtration of underground water with gas through a layer of the water-permeable incogherent rock spreading a bottom, to find out the laws of stable and pulsing submarine gas seep formation in NE region of the Black sea is examined. The lead analysis of mechanism of a filtration allows to specify directions of researches of ground sources of gas during sea expeditions and at model modelling for the purpose of development of methods of determination of quantity of ground gas streams.