

**ПРИБОРЫ, ИЗГОТОВЛЕННЫЕ  
В ЛАБОРАТОРИЯХ**

УДК 504.432

**СТЕНД ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ЛОКАЛЬНОГО АПВЕЛЛИНГА,  
ВЫЗВАННОГО ВСПЛЫВАЮЩИМИ ПУЗЫРЬКАМИ**

© 2024 г. Д. В. Черных<sup>a, b</sup>, Н. Е. Шахова<sup>a, b, c</sup>, Д. А. Космач<sup>a, b</sup>,  
А. В. Доманюк<sup>a</sup>, А. Н. Салюк<sup>a</sup>, Э. А. Спивак<sup>a, b</sup>, А. С. Саломатин<sup>a</sup>,  
Е. В. Гершелис<sup>b, d, e</sup>, И. П. Семилетов<sup>a, b</sup>

Поступила в редакцию 28.07.2023 г.

После доработки 20.09.2023 г.

Принята к публикации 20.11.2023 г.

Разработан и сконструирован экспериментальный стенд, позволяющий определить величину локального апвеллинга, вызванного непрерывно всплывающими пузырьками, в зависимости от их геометрических размеров и интенсивности их генерации (интенсивности потока газа). Стенд (рис.1а, б) состоит из прозрачной камеры 1, выполненной из ударопрочного плексигласа толщиной 10 мм; системы соединенных с камерой газовых трубок; установленных, в технические отверстия 7, датчиков электропроводимости (солености), работающих в диапазоне от 0 до 40 000 мкСм; расходомеров, работающих в диапазоне от 0.1 до 60 л/мин; системы подачи газовой смеси с регулируемым расходом вещества 5, включающей воздушный компрессор; осветительных приборов и системы видеорегистрации 6. Через патрубок 3 в камеру экспериментального стенда 1 поступают растворы с различной плотностью, формируя водную среду с ярко выраженной границей раздела 4. Для эффективного контроля за процессами, происходящими в водной среде стенда, более плотный (соленый) раствор окрашен. Через сопло или устройство генерации пузырьков 2 с помощью воздушного компрессора в камеру с заданным потоком подается газ (воздух или чистый метан) при этом образуются всплывающие пузырьки и формируется локальный апвеллинг.

Рис. 1

<sup>a</sup>Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН, Россия, Владивосток.

<sup>b</sup>Томский государственный университет, Россия, Томск.

<sup>c</sup>Институт динамики геосфер им. академика М.А. Садовского РАН, Россия, Москва.

<sup>d</sup>Научно-технологический университет “Сириус”, Россия, Краснодарский край, пгт. Сириус.

<sup>e</sup>Томский политехнический университет, Россия, Томск.

В зависимости от поставленной в эксперименте задачи пузырьки могут всплывать: 1) в одиночном виде, 2) в виде одиночной непрерывной цепочки или 3) в виде непрерывного массивованного выброса (рис. 1в). Все происходящие в водной среде экспериментального стенда события записываются с помощью цифровых видеокамер *b* (например, с помощью экшен-камер GoPRO). Величина локального апвеллинга определяется по изменяющейся электропроводимости (солености) водных растворов с помощью установленных в камеру стенда датчиков.

Разработанный экспериментальный стенд позволяет определить величину локального апвеллинга, вызванного непрерывно всплывающими пузырьками, в зависимости от их геометрических размеров, интенсивности их генерации (интенсивности потока газа) и типов их всплытия, а также получить коэффициенты, корректирующие величину газообмена, происходящего между всплывающими пузырьками и столбом жидкости. Полученные результаты позволят повысить точность методов количественной оценки современной эмиссии метана, поступающего из гидросферы в приводные слои атмосферы. Это особенно важно в условиях мелководного Восточно-Сибирского шельфа, на территории которого сосредоточено более 30% мирового запаса углеводородов, а их поступление в атмосферу (пузырьковый поток) определяется состоянием подводной мерзлоты [1–3].

От описанной в литературе установки [4], позволяющей изучать газообмен дискретно всплывающих пузырьков со столбом жидкости, данный стенд отличается возможностью исследования зависимости величины газообмена от величин потока (количества) непрерывно всплывающих пузырьков и локального апвеллинга, вызванного данными пузырьками.

#### ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант №22–67–00025) (разработка экспериментального стенда), а также в рамках программы развития Томского государственного университета (Приоритет–2030) (экспедиционные исследования в районах обнаружения газовых факелов) и государственного задания АААА–А20–120021990003–3 (разработка методов оценки потока метана).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

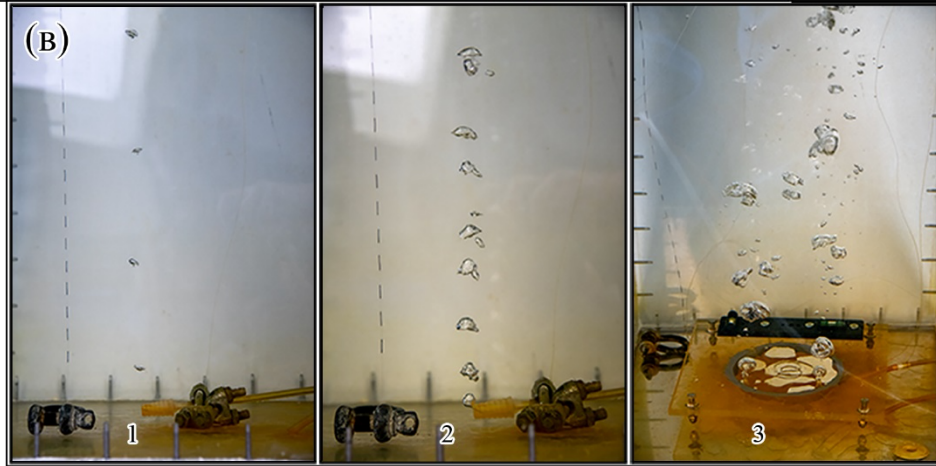
1. *Chernykh D., Yusupov V., Salomatin A., Kosmach D., Shakhova N., Gershelis E., Konstantinov A., Grinko A., Chuvilin E., Dudarev O., Koshurnikov A., Semiletov I.* // *Geosciences*. 2020. V. 10. № 10. P. 411. <https://doi.org/10.3390/geosciences10100411>
2. *Shakhova N., Semiletov I., Salyuk A., Yusupov V., Kosmach D., Gustafsson Ö.* // *Science*. 2010. V. 327. № 5970. P. 1246. DOI: 10.1126/science.118222
3. *Shakhova N., Semiletov I., Gustafsson O., Sergienko V., Lobkovsky L., Dudarev O., Tumskoy V., Grigoriev M., Mazurov A., Salyuk A., Ananiev R., Koshurnikov A., Kosmach D., Charkin A., Dmitrevsky N. et al.* // *Nature Communications*. 2017. V. 8. № 1. P. 1. <https://doi.org/10.1038/ncomms15872>
4. *Черных Д.В., Космач Д.А., Константинов А.В., Шахова Н.Е., Саломатин А.С., Юсупов В.И., Силионов В.И., Семилетов И.П.* // *ПТЭ*. 2019. № 1. С. 156. DOI: 10.1134/S0032816219010063

*Адрес для справок: Россия, 690041, Приморский край, Владивосток, ул. Балтийская, 43, Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН.*

*E-mail: denis.chernykh.vl@gmail.com*

## ПОДПИСЬ К РИСУНКУ

**Рис. 1.** а) Фотографии разработанного стенда. б) Принципиальная схема экспериментального стенда: 1 – камера экспериментального стенда, 2 – система генерации всплывающих пузырьков, 3 – патрубок для слива или подачи жидкостей в рабочую зону экспериментального стенда, 4 – граница раздела жидкостей разной плотности, 5 – система подачи газовой смеси с регулируемым расходом вещества, 6 – система видеорегистрации, 7 – технические отверстия для отбора проб и установки датчиков температуры и электропроводности (солености), 8 – светодиодные осветители. в) Пример генерации всплывающих пузырьков в виде одиночных пузырьков (1), непрерывной цепочки (2), массивованного выброса (3).



**Для связи с авторами:**

**Черных Денис Вячеславович**

**Тел.: 8-964-436-14-66 (моб.)**

**E-mail: [denis.chernykh.vl@gmail.com](mailto:denis.chernykh.vl@gmail.com)**

Саломатин Александр Сергеевич

E-mail: [salomatina@poi.dvo.ru](mailto:salomatina@poi.dvo.ru)