

УДК 532.6

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ПУЗЫРЬКОВ ВОЗДУХА В ВОДЕ ПРИ БЫСТРОЙ ДЕКОМПРЕССИИ

Б.В. Борц<sup>1)</sup>, Ю.Г. Казаринов<sup>1,2)</sup>, С.Ф. Скоромная<sup>1)</sup>, В.И. Ткаченко<sup>1,2)</sup>

<sup>1)</sup> ННЦ "Харьковский физико-технический институт"  
 г. Харьков, ул. Академическая, 1, Украина

<sup>2)</sup> Харьковский национальный университет имени В.Н. Каразина  
 г. Харьков, пл. Свободы, 4, Украина  
 E-mail: [tkachenko@kipt.kharkov.ua](mailto:tkachenko@kipt.kharkov.ua)

Received 16 January 2012, accepted 9 February 2012

Экспериментально исследованы процессы выброса пузырьков воздуха из водопроводной воды при ее быстрой декомпрессии. Эксперименты проведены на экспериментальной установке, представляющей собой ячейку высокого давления с полезным объемом 10,6 см<sup>3</sup>. Ячейка выдерживает давление до 20 МПа. Быстрая декомпрессия достигалась прорывом алюминиевых фольг в результате медленного подъема давления в ячейке с помощью поршня. Прорыв фольг происходил при давлении, которое задавалось определенным количеством фольг. Показано, что сжатый до давления 10 МПа отдельный пузырек после быстрой декомпрессии к моменту времени  $t = 0,33$  с резко возрастает в объеме. В дальнейшем, при  $t > 0,5$  с крупные пузырьки медленно поглощают расположенные поблизости мелкие пузырьки воздуха. На больших временах, при  $t > 3$  с, процесс выброса и перераспределения газовых пузырьков завершается. Показано качественное соответствие теоретических расчетов полученным в работе экспериментальным результатам.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** декомпрессия, водопроводная вода, газонасыщенность, ячейка высокого давления, автомобильная динамика.

## AN EXPERIMENTAL STUDY OF AIR BUBBLES DYNAMICS IN WATER AT THE RAPID DECOMPRESSION

B.V. Borts<sup>1)</sup>, Y.G. Kazarinov<sup>1,2)</sup>, S.F. Skoromnaya<sup>1)</sup>, V.I. Tkachenko<sup>1,2)</sup>

<sup>1)</sup> National Science Center "Kharkiv Institute of Physics and Technology"

1, Akademicheskaya St., Kharkov, Ukraine

<sup>2)</sup> V.N. Karazin Kharkiv National University  
 4, Svobody Sq., Kharkov, Ukraine

The processes of air bubbles emission in a tap water at the fast decompression are experimentally investigated. Experiments were carried out on the experimental setup - a high-pressure cell with a useful volume of 10.6 cm<sup>3</sup>. The cell can withstand pressures up to 20 MPa. Rapid decompression was achieved by tearing the aluminum foils due to the slow rise of pressure in the cell by the plunger. The tearing of foils began at a pressure, which was set by a certain number of foils. It is shown that volume of a single bubble compressed to 10 MPa after a rapid decompression at time  $t = 0.33$  s sharply increases. Further at  $t > 0.5$  s large bubbles slowly absorb the nearby small air bubbles. At large time scale ( $t > 3$  s) the process of release and redistribution of gas bubbles is completed. A qualitative agreement of theoretical calculations with obtained experimental results is shown.

**KEY WORDS:** decompression, tap water, gas saturation, high-pressure cell, the self-similar dynamics.

## ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІКИ ПУХИРЦІВ ПОВІТРЯ У ВОДІ ПРИ ШВИДКІЙ ДЕКОМПРЕСІЇ

Б.В. Борц<sup>1)</sup>, Ю.Г. Казарінов<sup>1,2)</sup>, С.Ф. Скоромна<sup>1)</sup>, В.І. Ткаченко<sup>1,2)</sup>

<sup>1)</sup> ННЦ "Харківський фізико-технічний інститут"

м. Харків, вул. Академічна, 1, Україна

<sup>2)</sup> Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна  
 м. Харків, м. Свободи, 4, Україна

Експериментально досліджені процеси викиду пухирців повітря з водопровідної води при її швидкій декомпресії. Експерименти проведені на експериментальній установці, що представляє собою осередок високого тиску з корисним об'ємом 10,6 см<sup>3</sup>. Осередок витримує тиск до 20 МПа. Швидка декомпресія досягалася проривом алюмінієвих фольг в результаті повільного підйому тиску в осередку за допомогою поршня. Прорив фольг відбувався при тиску, який задавався певною кількістю фольг. Показано, що стислий до тиску 10 МПа окремих пухирець після швидкої декомпресії до моменту часу  $t = 0,33$  с різко зростає в об'ємі. Надалі, при  $t > 0,5$  с великі пухирці повільно поглинають розташовані поблизу дрібні пухирці повітря. На більших часах, при  $t > 3$  с, процес викиду й перерозподілу газових пухирців завершується. Показано якісну відповідність теоретичних розрахунків отриманим у роботі експериментальним результатам.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** декомпресія, водопровідна вода, газонасиченість, осередок високого тиску, автомобільна динаміка.

Известно, что жидкости способны выделять растворенные в них газы. Эти процессы создают опасные для организма человека состояния в результате быстрого уменьшения барометрического давления (декомпрессии), которые обусловлены, например, нарушением герметичности кабины самолета на большой высоте [1]. При этом, как и в случае быстрого подъема водолаза на поверхность с большой глубины, возникает декомпрессионная, или кессонная болезнь - заболевание, в результате которого растворенные в крови и тканях организма человека газы выделяются в виде пузырьков и нарушают кровообращение человека, иногда, с летальным исходом [2].

Декомпрессионные процессы в жидкостях аналогичны зарождению и выделению новой фазы при диффузионных распадах многокомпонентных твердых растворов в различных технологических процессах [3]. Диффузионный распад

многокомпонентных твердых растворов сопровождается образованием в среде выделений новой фазы (зародышей) с определенным объемным распределением, что ведет к ухудшению их эксплуатационных характеристик.

Условно различают три стадии диффузионного распада метастабильной системы, распадающейся с образованием зародышей новой фазы [3].

В условиях достаточно большого начального пересыщения точечными дефектами первая стадия распада наблюдается, когда интенсивно образуются устойчивые зародыши макродефектов (поры, дислокационные петли, газонаполненные полости, у которых хотя бы один размер является макроскопическим, т.е. больше критического). На этой стадии количество вещества в зародышах мало по сравнению с заданным, и начальное пересыщение практически постоянно.

Переходная, или вторая, стадия диффузионного распада наступает, когда количество вещества в новой фазе сравнимо с начальным, и начальное пересыщение начинает падать. На этой стадии число выделений новой фазы практически постоянно, а объем фазы увеличивается в основном за счет роста выделений.

Третья стадия диффузионного распада характеризуется достаточно большим размером зародышей при малом начальном пересыщении. Физику процессов в этом случае определяют поверхностное натяжение границ новой фазы и закон сохранения точечных дефектов. На этой стадии распада наблюдается рост выделений большого размера за счет выделений малого размера. При этом не наблюдается возникновение новых зародышей.

Третья стадия диффузионного распада является наиболее опасной для эксплуатационных характеристик рассматриваемого материала, т.к. увеличивается его начальный объем и деградируют прочностные характеристики.

В работах [4,5] на основе кинетического уравнения для газовых пузырьков в жидкости в пространстве размеров [6], модифицированного учетом конвективных процессов, теоретически исследована временная динамика газовых пузырьков. Здесь указаны условия существования и определены параметры стационарных пузырьков в жидкости при различных режимах изменения во времени их объема и количества атомов газа в них. Построена кривая зависимости объема равновесного газового пузырька от количества атомов газа в нем, описана автомодельная динамика пузырьков при уменьшении внешнего давления. В автомодельном приближении показано, что в режиме быстрой декомпрессии (уменьшение внешнего давления во времени по степенному закону) среднее количество пузырьков газа уменьшается, а среднее число атомов в них возрастает за счет поглощения атомов газа, растворенного в жидкости.

Явление диффузионного распада в виде выброса газовых пузырьков при декомпрессии жидкости может быть использовано в технологических приложениях. Как следует из предыдущего изложения, процесс наблюдается как при большой, так и при малой пересыщенности жидкости зародышами новой фазы.

В качестве примера использования этого явления при решении технологической задачи приведем способ извлечения сероводородной воды с больших глубин Черного моря [7]. При реализации этого способа основным элементом являются пузырьки сероводорода, которые формируются в морской воде при быстрой ее декомпрессии, аналогично тому, как это происходит в газонасыщенной воде [4,5]. Экспериментальная проверка теоретических выводов относительно выброса пузырьков сероводорода при декомпрессии морской воды технически трудно осуществима. Поэтому для моделирования такого процесса может быть использована водопроводная вода с растворенным в ней воздухом. При этом условия в морской воде с растворенным в ней сероводородом обеспечиваются выбором исходного давления и газонасыщенности воды воздухом.

Целью настоящей работы является экспериментальное моделирование явления диффузионного распада морской воды в виде выброса сероводородных пузырьков при быстрой декомпрессии на примере диффузионного распада водопроводной воды.

### МАТЕРИАЛЫ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Известно, что в водопроводной воде со временем отстаивания 0,25 — 5,0 часов присутствуют пузырьки воздуха радиусом от  $R_{\max} \approx 3 \cdot 10^{-5}$  м до минимального, радиус которого определим как  $R_b^{\min} \approx 2 \cdot R_0 = 6 \cdot 10^{-10}$  м, где  $R_0 \approx 3 \cdot 10^{-10}$  м — эффективный радиус “атома” воздуха [8]. Отметим, что значение минимального радиуса пузырька воздуха  $R_0$  попадает в теоретически рассчитанный интервал размеров пузырьков в области их зарождения  $2,7 \cdot 10^{-10} \text{ м} < R_0 < 6,7 \cdot 10^{-10} \text{ м}$  [9].

Величину стационарного радиуса пузырька воздуха в водопроводной воде зададим равной  $R_b \approx 6,6 \cdot 10^{-8} \sim 10^{-7}$  м, что по порядку величины совпадает со значением “усредненного” радиуса, экспериментально установленного в [10]:  $\bar{R} \approx (1,8 \pm 0,2) \cdot 10^{-7} \sim 10^{-7}$  м.

Таким образом, величина размера зародышевой фазы (радиуса пузырька) такова, что в равновесном пузырьке воздуха наблюдаются процессы, обусловленные поверхностным натяжением. Это должно приводить к развитию третьей стадии диффузионного распада, когда наблюдается рост выделений большого размера за счет ухода малого размера.

Для экспериментальной проверки выделения пузырьков воздуха из водопроводной воды при быстрой декомпрессии была разработана и создана экспериментальная установка, представляющая собой ячейку высокого давления (ЯВД) с полезным объемом 10,6 см<sup>3</sup>. Чертеж и внешний вид ЯВД приведены на рис. 1. и рис. 2. соответственно. В полезный объем основной вклад дает объем камеры 8.

ЯВД представляет собой цилиндрическое отверстие (8) в металлическом прямоугольнике 64x64x48, которое закрывается с обеих сторон двумя плексигласовыми цилиндрами (4). Толщина плексигласовых цилиндров рассчитывалась так, чтобы они выдерживали давление до 20 МПа. Цилиндры, через резиновые прокладки, прижимаются к металлическому прямоугольнику через прямоугольную шайбу четырьмя болтами. С одной стороны прямоугольника вмонтирован поршень для сжатия воды (6). С других сторон металлического

прямоугольника сделаны технологические отверстия для заливки воды (2), для подключения датчика давления (1), для напуска газа в объем жидкости (5) и для сброса давления (3). Давление сбрасывается через отверстие (3) в результате прорыва нескольких алюминиевых фольг, происходящего из-за подъема давления в ЯВД с помощью поршня (6). Алюминиевые фольги толщиной 1,5 мкм располагаются между фторопластовыми шайбами (10), которые, для обеспечения герметичности, сильно сжаты между корпусом ячейки и стальной шайбой с отверстием  $\varnothing = 6$  мм. Давление прорыва фольг задавалось величиной 10 МПа, что соответствует глубине моря 1000 м. Указанное давление обеспечивается экспериментально определенным количеством фольг: 18-19 штук. Время сжатия воды до прорыва фольг составляет 40 с.

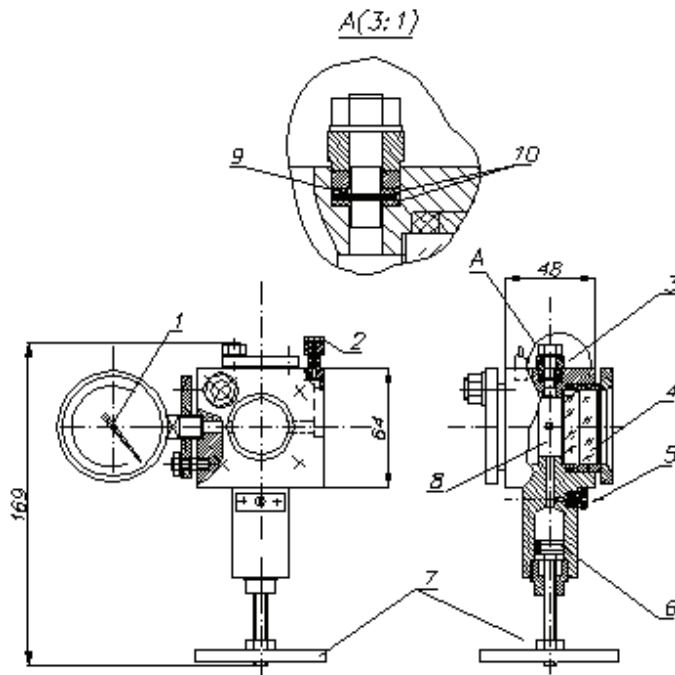


Рис. 1. Чертеж ячейки высокого давления.

1. Манометр; 2. Отверстие для заливки воды; 3. Выпускной клапан;
4. Окно; 5. Отверстие для напуска газа; 6. Поршень; 7. Вентиль;
8. Камера; 9. Алюминиевые фольги; 10. Фторопластовые шайбы.

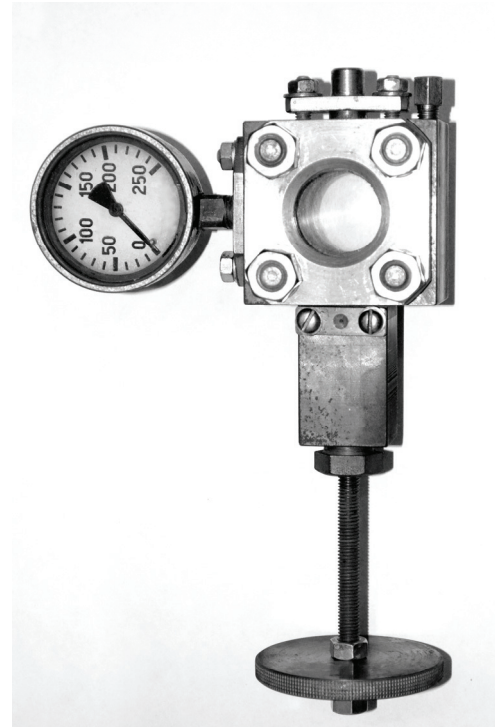


Рис. 2. Внешний вид ячейки высокого давления.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

### Выброс пузырьков воздуха при быстрой декомпрессии воды

Эксперименты проводились для давлений 7,0 – 10,0 МПа. Как отмечено выше, в качестве жидкости, моделирующей черноморскую воду, использовалась водопроводная вода. Газонасыщенность водопроводной воды соответствовала величине, порядка  $0,01 \text{ м}^3/\text{м}^3$  [8] и соответствовала газонасыщенности черноморской воды на глубине 1000 м [11].

На рис. 3–6 показаны фотографии состояния воды в ЯВД в разные моменты времени. Фотографии отобраны из большого количества фотографий, полученных в результате проведения серии экспериментов, и отражают основные особенности поведения пузырьков воздуха при быстрой декомпрессии воды.

На рис. 6. приведена динамика газовых пузырьков в воде, начиная с момента прорыва фольг ( $t = 0$  с) и до момента установления в ЯВД атмосферного давления ( $t = 2,67$  с), когда перераспределение газовых пузырьков практически завершено. Как следует из приведенных снимков, сжатый до давления 10 МПа отдельный пузырек (рис. 4.) после быстрой декомпрессии (прорыва фольг) к моменту времени  $t = 0,33$  с резко возрастает в объеме. При этом некоторые, более мелкие пузырьки, первоначально визуальны не наблюдаемые из-за малых размеров, также увеличиваются в объеме. В дальнейшем, при  $t > 0,5$  с крупные пузырьки медленно поглощают расположенные поблизости мелкие пузырьки воздуха. На временах  $t > 3$  с процесс выброса и перераспределения газовых пузырьков завершается.

Оценим объем газовых пузырьков, выделенных из жидкости в результате быстрой декомпрессии. Для этого сравним объемы газовых пузырьков до и после декомпрессии, используя градуировочную сетку на рис. 3. и рис. 5. Из рис. 5. следует, что площадь, занимаемая максимальным по объему пузырьком равна площади около 564 ячеек градуировочной сетки, и оказывается порядка площади, занимаемой пузырьком на рис. 3. – 618 ячеек градуировочной сетки. Поскольку пузырьки на рис. 3. и на рис. 5. находятся при одинаковом давлении (0,1 МПа), то начальное и конечное (после декомпрессии) содержание воздуха в пузырьках пропорционально занимаемой ими площади на градуировочной сетке, и, следовательно, равно.

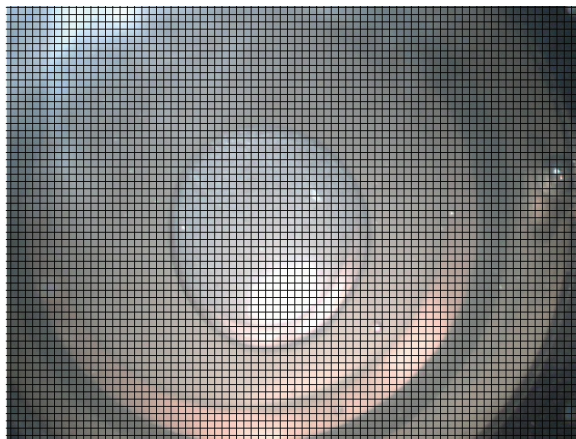


Рис. 3. Вода при атмосферном давлении (в начале фазы сжатия). Для сравнительного определения объема газа на этом рисунке и ниже нанесена градуировочная сетка с размером ячейки 0,4 мм.

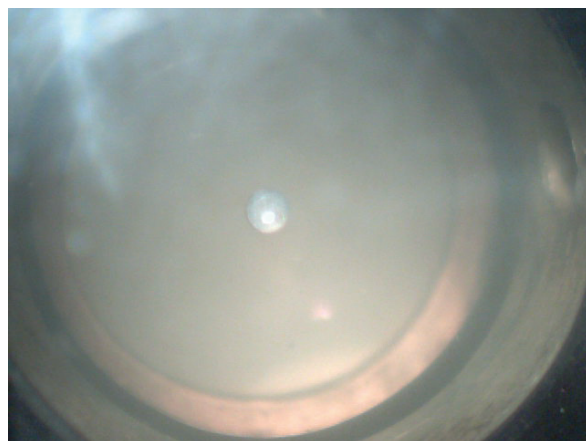


Рис. 4. Вода при давлении 10 МПа. Диаметр пузырька газа порядка ~2 мм.

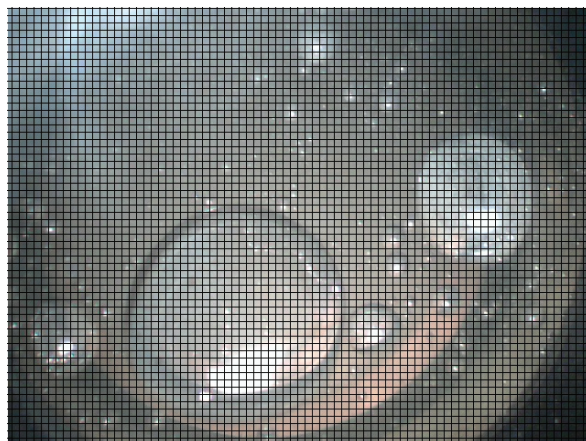


Рис. 5. Вода при давлении 0,1 МПа (после декомпрессии).

Таким образом, начальное содержание воздуха в виде пузырька большого размера можно исключить из рассмотрения. Из этого следует, что объем выделившихся в результате быстрой декомпрессии пузырьков воздуха определяется оставшимися газовыми пузырьками. Объем последних сравним с объемом первичного пузырька воздуха и, после усреднения по объему воды, соответствует начальной газонасыщенности водопроводной воды –  $0,01 \text{ м}^3/\text{м}^3$  [8].

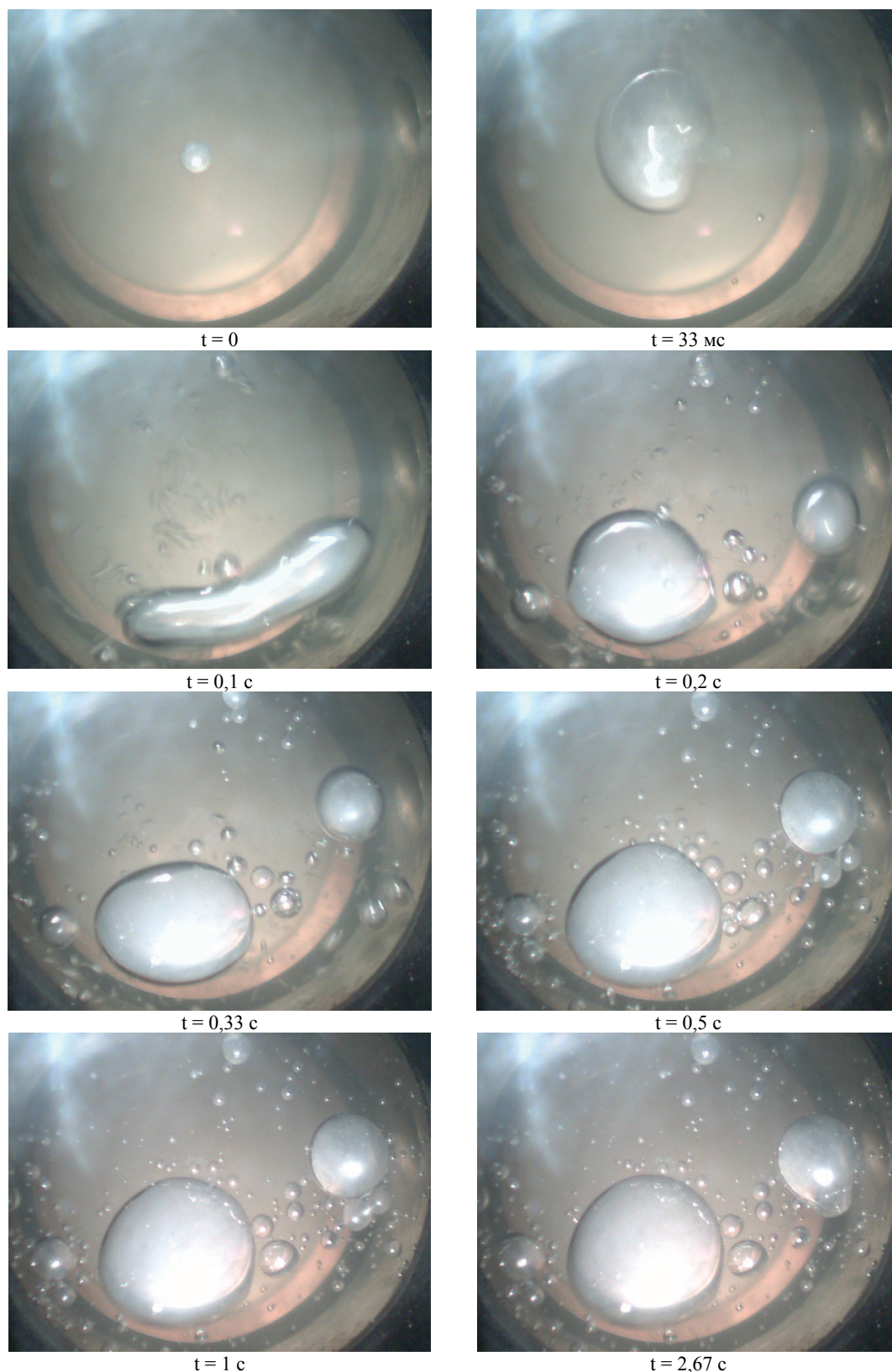


Рис. 6. Динамика газовых пузырьков в ЯВД при быстрой декомпрессии от давления 10,0 МПа ( $t = 0 \text{ с}$ ) до атмосферного давления 0,1 МПа ( $t = 33 \text{ мс}$ ).

#### АВТОМОДЕЛЬНОЕ ОПИСАНИЕ БЫСТРОЙ ДЕКОМПРЕССИИ ВОДЫ

Результаты экспериментального исследования временной динамики выброса пузырьков воздуха из водопроводной воды качественно соответствует найденному в работе [5] решению кинетического уравнения для газовых пузырьков в жидкости при уменьшении во времени внешнего давления.

Для удобства в [5] предполагалось, что первоначально находящаяся под большим давлением  $p_0$  жидкость, в силу внешних процессов (в нашем случае – прорыв фольги), быстро теряет его во времени по степенному закону  $p(t) = p_0 (t + t_0)^\delta \cdot t_0^{-\delta}$ , где:  $\delta < 0$  - параметр, определяемый исходя из условий эксперимента,  $t_0$  - заданное характерное время изменения давления. Выбор темпа изменения давления во времени по степенному закону является модельным. Он наиболее прост и призван продемонстрировать основные особенности поведения пузырьков воздуха в воде при быстрой декомпрессии.

Учитывая вид коэффициентов кинетического уравнения, описывающего газы в жидкости [5], естественно предположить, что давление в жидкости и в газовом пузырьке отслеживают изменение внешнего давления, и подчиняются аналогичному закону изменения во времени:

$$p(t) \simeq p^L = p_0^L (t + t_0)^\delta \cdot t_0^{-\delta}, \quad p^V = p_0^V (t + t_0)^\delta \cdot t_0^{-\delta}. \quad (1)$$

Для автомодельной функции  $\Phi(\xi, \zeta)$  и автомодельных переменных  $\zeta$  и  $\xi$  можно использовать следующую запись, которая также характеризуется степенной зависимостью от времени, но с другим показателем степени:

$$\Phi(\xi, \zeta) = f(V, N, t) (t + t_0)^\mu t_0^{-\mu}; \quad \zeta = \frac{3V}{4\pi} (t + t_0)^{3\delta} \cdot t_0^{-3\delta}; \quad \xi = N (t + t_0)^\nu t_0^{-\nu}. \quad (2)$$

Здесь:  $\mu, \nu$  - показатели степени, определяемые из исходного кинетического уравнения [8].

Предложенные подстановки (2), при условиях соблюдения стационарности  $\frac{\partial \Phi(\xi, \zeta)}{\partial \xi} = \frac{\partial \Phi(\xi, \zeta)}{\partial \zeta} = 0$ ,

$n^L(t) = const$  и линейной зависимости объема газовых пузырьков от количества атомов в нем, определяют величину показателя степени  $\mu$ :

$$\mu = \frac{t_0 \sigma_\infty}{2\eta R_0} \left( 1 - \frac{R_b}{R_0} \right) \equiv \frac{t_0 \sigma_\infty}{2\eta R_0} \left( 1 - 2\eta \alpha W_0 \frac{D}{l \sigma_\infty} n^L \ln \frac{p_0^V}{p_0^L} \right), \quad (3)$$

где:  $R_0$  - начальный минимальный радиус пузырька воздуха,  $R_b$  - стационарный радиус пузырька воздуха в водопроводной воде, остальные обозначения соответствуют принятым в [5].

Из (3) следует, что для равновесного пузырька ( $R_0 = R_b$ ) показатель степени  $\mu = 0$ . При  $R_0 < R_b$  показатель степени отрицателен ( $\mu < 0$ ), а при  $R_0 > R_b$  – положителен ( $\mu > 0$ ).

Используя представления (1), (2) нетрудно проанализировать динамику изменения во времени следующих параметров пузырьков: среднего числа пузырьков в жидкости  $N_b(t) = \int_0^\infty \int_0^\infty f(V, N, t) dV dN$  и среднего их

размера  $\bar{V}(t) = \int_0^\infty \int_0^\infty V f(V, N, t) dV dN$  (или среднего количества атомов газа в пузырьке, т.к.

$$\bar{N}(t) = W_0^{-1} \cdot \bar{V}(t)).$$

Перечень возможных изменений средних величин  $N_b(t)$  и  $\bar{V}(t)$  в процессе декомпрессии приведен в таблице.

Отмеченная в таблице динамика газовых пузырьков должна обеспечивать сохранение общего количества атомов газа. Закон сохранения атомов газа в единичном объеме жидкости имеет вид:

$$N_b \cdot \bar{N} + 1 \cdot n^L(t) = const. \quad (4)$$

Таблица.

Показатели динамики газовых пузырьков в воде при уменьшении внешнего давления

$\mu$	1	2	3	4	5
	$\mu < 6$	$\mu = 6$	$6 < \mu < 9$	$\mu = 9$	$\mu > 9$
$N_b(t)$	+	0	—	—	—
$\bar{V}(t), \bar{N}(t)$	+	+	+	0	—

Примечание. Здесь знаки +, 0, — отвечают росту, постоянству или уменьшению средних  $N_b(t)$  и  $\bar{V}(t)$ .

Учитывая (4), а также  $n^L(t) = const$ , показатель степени изменения во времени автомодельной функции  $\Phi(\xi, \zeta)$ , при учете условий (4) и  $n^L(t) = const$ , равен  $\mu = 7,5$ . В этом случае показатели динамики газовых пузырьков в воде попадают в диапазон 3 таблицы. При этом среднее количество пузырьков воздуха уменьшается, а среднее число атомов в них возрастает за счет поглощения атомов газа, растворенных в жидкости.

Таким образом, описанная в [5] автомодельная динамика выброса пузырьков воздуха из воды, качественно соответствует продемонстрированной в эксперименте.

### ВЫВОДЫ

В работе представлены результаты экспериментального исследования процессов выброса пузырьков воздуха из водопроводной при ее быстрой декомпрессии. Для этого разработана и создана экспериментальная установка, представляющая собой ячейку высокого давления с полезным объемом 10,6 см<sup>3</sup>. Ячейка выдерживает давление вплоть до 20 МПа. Быстрая декомпрессия достигалась прорывом набора алюминиевых фольг в результате медленного подъема давления в ячейке с помощью поршня. Прорыв фольг происходил при давлении 10 МПа, которое задавалось подбором определенного количества фольг. Показано, что сжатый до давления 10 МПа отдельный пузырек воздуха после быстрой декомпрессии к моменту времени  $t = 0,33$  с резко возрастает в объеме, приобретая первоначальный объем. Более мелкие пузырьки, первоначально визуальное не наблюдаемые из-за малых размеров, также увеличиваются в объеме. В дальнейшем, при  $t > 0,5$  с крупные пузырьки медленно поглощают расположенные поблизости мелкие пузырьки воздуха. На больших временах, при  $t > 3$  с, процесс выброса и перераспределения газовых пузырьков завершается. Показано качественное соответствие теоретических расчетов полученным в работе экспериментальным результатам.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Viollet F. Vzryvnaya dekompressiya i eyo deystvie na organizm cheloveka. - M.: Voenizdat, 1961. - 128s.
2. Artamonova V.G., Shatalov N.N. Profesionalnye bolezni: - M.: Medicina, 1996. - 432 s.
3. Slezov V.V. Theory of diffusive decomposition of solid solutions (I.M. Khalatnikov, Ed.). 1995. - Vol. 17, part 3. - P.1-214.
4. Skoronnaya S.F., Tkachenko V.I. Stacionarnie sostoyaniya i avtomodelnaya dinamika gazovyh puzirkov v zhidkih sredah. Trudi XIX mezhdunarodnoi konferencii po fizike radiacionnih yavlenii i radiacionomu materialovedeniyu, 06-11 sentyabrya 2010 g., Alushta, Krym, S.371-373.
5. Borts B.V., Skoronnaya S.F., Tkachenko V.I. Stacionarnie sostoyaniya i avtomodelnaya dinamika gazovyh puzirkov v zhidkih sredah pri umenshenii vneshnego davleniya. Vestnik Harkovskogo nacionalnogo universiteta, seriya: fizicheskaya "Yadra, chastici, polya". - 2011. - № 946, vyp. 1(49). - S. 81 - 89.
6. Slezov V.V. Metod virtual'nyh sred v teorii fazovyh prevraschenij pervogo roda // FTT. - 2000. - T. 45. - Vyp. 4. - S. 733-740.
7. Borts B.V., Nekliudov I.M., Polevich O.V., Tkachenko V.I. Sposib dobuvannya sirkovodnyu z morskoi vody. Patent Ukrainy na korisnu model № 25861 vid 27.08.2007.
8. Gavrilov L.R. Soderzhanie svobodnogo gaza v zhidkostyah i metody ego izmerenija / V kn. Fizika i tehnika mochshnogo ul'trazvuka. T. III Fizicheskie osnovy ul'trazvukovoy tehnologii. Pod. red. L.D. Rozenberga. - M.: Nauka, 1970. - S.305-426.
9. Makarov V.K., Makarova T.V. Raspredelenie po razmeram puzyr'kov svobodnogo gaza v zhidkosti pri razlichnyh urovnjah ee gazosoderzhanija // Trudy Odesskogo politehnicheskogo universiteta. - 2008. - Vyp. 2(30). - S.219 - 223.
10. Emec B.G. Opredelenie metodom jadernogo magnitnogo rezonansa srednih razmerov i koncentracii vozdushnyh puzyr'kov, soderzhashihsva v vode // Pis'ma v ZhTF. - 1997. - T. 23. - Vyp. 19. - S. 42-45.
11. Borts B.V., Nekliudov I.M., Polevich O.V., Tkachenko V.I., Shilyaev B.A. Alternativnaya serovodorodnaya energetika Chornogo morya. Sostoyanie, problemy, perspektivy. Ch.1 / Alternativnaya energetika i ekologiya. - 2006. - №12(44). - S.23-30.