____ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ _____ НА МЕЖФАЗНЫХ ГРАНИЦАХ _____

УДК 541.138:540+541.13

О МЕХАНИЗМЕ ВОЗНИКНОВЕНИЯ КАВИТАЦИОННОГО ЭФФЕКТА НА ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИ НАВОДОРОЖЕННОМ ПАЛЛАДИИ

© 2020 г. Б. Ф. Ляхов^{1, *}, Л. Н. Солодкова¹, Н. Г. Ануфриев¹, Л. Н. Ващенко¹, И. И. Бардышев¹, В. А. Котенев¹, А. Ю. Цивадзе¹

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина РАН, Ленинский пр-т, 31, корп. 4, Москва, 119071 Россия

> *e-mail: lyakhov.b@yandex.ru Поступила в редакцию 20.04.2020 г. После доработки 30.04.2020 г. Принята к публикации 07.05.2020 г.

Установлена взаимосвязь между количеством электрохимически внедренного в Pd водорода, объемными и линейными размерами возникающей системы PdH, а также интенсивностью процесса кавитации, возникающего после насыщения Pd водородом. Представленные результаты исследований позволяют описать механизм появления кавитации на PdH, несмотря на отсутствие возможности выяснить состав атмосферы в объемных дефектах (микропустоты, микротрещины, дислокации), образуемые в процессе наводораживания Pd. Использована модель Гарвея–Кнеппа, которая лучше всего описывает возникновение кавитации на несмачиваемых поверхностях с мелкими трещинами. Модель основана на предположении о наличии в воде кавитационных ядер в виде очень мелких воздушных пузырей.

Ключевые слова: система палладий-водород, электролитическое наводораживание, газовыделение, кавитация

DOI: 10.31857/S0044185620050198

введение

Появляющийся в последнее время интерес к кавитационным явлениям охватывает широкий диапазон от чисто научных до сугубо прикладных проблем [1], например, для очистки различных технических жидкостей от газовых примесей [2]. В настоящее время наиболее употребляемыми для дегазации воды и других технических жидкостей являются либо вакуумные насосы соответствующих конструкций [3], либо облучение ультразвуком [4]. В работе [5] был разработан новый метод искусственного создания гидростатической кавитации с целью дегазации технических жидкостей (вода, водные растворы, спирты, альдегиды и другие типы жидкостей) с помощью электрохимически наводороженного палладия, который более удобен в эксплуатации.

Было показано, что кавитационный процесс в очищаемых жидкостях на наводороженном электрохимическим путем палладии возникает в результате реализации уникального свойства Pd: увеличивать свои линейные и объемные размеры в процессе электролиза по мере увеличения концентрации водорода в палладии вплоть до соотношения H : Pd = 0.72–0.75 [5].

Увеличение линейных размеров PdH приводит либо к уменьшению толшины промежуточного слоя между Pd и исследуемой жидкостью (гидростатическая кавитация), либо к созданию канальчатой структуры на поверхности Pd, по которой с большой скоростью движется исследуемая жидкость (гидродинамическая кавитация), либо это связано с образованием малоподвижных дефектов типа микропустот, микротрещин и дислокаций при наводораживании, которые не удаляются из решетки во время кратковременного отжига. Во всех случаях происходит снижение давления в промежуточном слое между электродом PdH и жидкостью, в которую он погружен, вплоть до значений меньших значения давления насышенных паров исследуемой жидкости. Так, для дистиллированной воды это давление – 2.34 кПа, что соответствует 17.5 мм рт. ст. [6]. В результате возникают кавитационные полости. заполняемые либо паром, образующимся от процесса испарения жидкости с внутренней поверхности полости, либо газом, растворенным в результате диффузии в исследуемой жидкости, либо парогазовой смесью. Образующиеся при этом парогазовые пузыри поднимаются в область высокого давления, где схлопываются, водяной пар уходит из пузыря и превращается в воду, а оставшийся газ выходит из жидкости в виде пузырей.

Целью настоящей работы является более детальное изучение влияния изменения геометрических размеров PdH на ее кавитационные свойства.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

В работе использовались плоские образцы Pd толщиной 40 мкм с длиной рабочей части 1 см и шириной 0.5 см. Перед электрохимически наводораживанием (ЭХН) при плотности тока 10 мА/см² в 1 М растворе NaOH при комнатной температуре образцы проходили следующие режимы обработки: холодная прокатка, отжиг при температуре 600°С в вакууме и анодное активирование при плотности тока 10 мА/см² в 1 М растворе NaOH в течение 1 мин. В этом же растворе проводилось ЭХН палладиевых образцов при катодной плотности тока 10 мА/см² до насыщения Pd водородом (H : Pd = 0.72-0.75). Затем осуществлялась электрохимическая десорбция (разводораживание, ЭХД) этого же образца по следующей схеме: сначала, примерно, 70% водорода удалялось из образца при постоянном анодном токе, равном катодному току (используемому для наводораживания). Оставшийся водород удаляли из образца в потенциостатическом режиме при потенциале – 0.2 В относительно хлорсеребряного электрода сравнения с тем, чтобы избежать выделения кислорода на поверхности электрода и одновременно измерить количество водорода в Pd электрохимическим методом.

Помимо электрохимического (описанного выше) метода определения водорода в образцах Pd, нами еще использовался вакуумно-десорбционный метод с экстракционной температурой в 400°С [7]. Для in situ регистрации изменения длины образца во время ЭХН или ЭХД использовался дилатометр, конструкция которого подробно описана в [8]. Чувствительность используемого электромагнитного датчика перемещений в описываемом дилатометре составляла 0.025 мкм на 1 мВ выходного сигнала. Калибровка датчика проводилась по удлинению эталонов при фиксированных температурах. Аналоговый выход датчика с помощью контроллера был связан с компьютером, регистрирующим изменение длины образца во время электролиза и термодесорбции. Во время проведения опытов образец закрепляли в держателе и помещали в сосуд с электролитом так, чтобы уровень электролита совпадал с верхней линией рабочей части образца. Электрохимическую ячейку с анодом из предварительно наводороженного в отдельной электрохимической ячейке Pd (с тем, чтобы в рабочую ячейку не выделялся кислород с анода) и хлорсеребряным

электродом сравнения, отделенного от основного объема электролита стеклянными кранами, присоединяли к встроенному в компьютер потенциостату.

Для проведения десорбции водорода помощью термоудара (с целью изучения остаточных явлений при десорбции разными методами), после ЭХН сосуд с электролитом удаляли из-под образца Pd, образец промывали и сушили на воздухе, а затем в течении 3–4 с нагревали в пламени газовой горелки до появления темно-красного каления (температура 600–700°С).

Для получения зависимости удельного электросопротивления (р) образцов Pd от концентрации водорода в нем при электрохимическом наводораживании использовали образцы, изготовленные из отожженной холоднокатаной Pd-фольги толщиной $75 \times 10 \times 0.04$ мм, имеющие рабочую поверхностью 15 см² (с двух сторон). В отверстия на краях образца были запрессованы 2 отрезка изолированная медной проволоки длиной 150 мм, диаметром 1 мм в качестве токоподвода. Место контакта проволоки с фольгой изолировалось эпоксидной смолой. Электрохимическое наводораживание проводилось в ячейке с разделенным катодным и анодным пространством объемом 1 л в 1 М растворе NaOH при плотности тока 10 мА/см² в течение времени, необходимого до достижения нужной концентрации водорода в Pd. Измерение электросопротивления палладиевой фольги, которая переносилась в стакан с дистиллированной водой после струйной промывки, осуществлялось с помощью универсального автоматического прибора "Эксперт-004" (ООО "Эконикс-Эксперт", г. Москва), путем приложения постоянного напряжения к токоподводам образца величиной (2 ± 0.001) мВ и измерения тока (с точностью 1 нА), значения которого регистрировались с периодичностью 1 с портативным компьютером с помощью программы EXP2PR в течение 200 с. Значения р усреднялись, стандартное отклонение полученных величин не превышало 0.2%. Во время электролитического наводораживания образец палладия отключался от измерительной схемы и был полностью погружен в электролит.

Тонкое строение кристаллической решетки Pd после наводораживания или разводораживания исследовали рентгенографически на аппарате ДРОН-2 с отфильтрованным медным излучением. Размер областей когерентного рассеяния (ОКР) и величину относительных среднеквадратичных микроискажений определяли по методу Уоррена—Авербаха [9].

(a) (б) $\epsilon_0 \times 10^4$ $\varepsilon_0 \times 10^4$ 100 10 90 0 4 5 6 0 30 60 2 3 t, мин Число циклов

Рис. 1. Изменение относительного удлинения образца: а – после отжига палладия в пламени при температуре 600–700°С в течение 3–4 с, прямоугольники – общее удлинение, заштрихованные прямоугольники – удлинение за один цикл; б–в процессе ЭХН ($D_k = 10 \text{ мA/см}^2$, 10 мин.) и ЭХД ($D_a = 10 \text{ мA/см}^2$ в течение 7 мин, затем потенциостатически при –0.2 В относительно хлорид-серебряного электрода). A - ЭХН, B - ЭХД, C - отжиг при температуре 600–700°С.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1а приведены данные холостого опыта, характеризующие изменение длины фольги из Pd после проведения циклов нагрев-охлаждение (в режиме термоудара без предварительного наводораживания). Первый цикл такой термообработки приводит к появлению остаточного относительного удлинения $\Delta L/L = 7.5 \times 10^{-4}$ (7.5 мкм на 1 см длины образца). В последующих циклах приращение величины ΔL уменьшается и после 6-го цикла отжиг уже не сопровождается увеличением длины образца. Изменение длины образцов после отжига, по-видимому, связано с закалкой вакансий при быстром охлаждении на воздухе. По порядку величины, рассчитанной по максимальному удлинению ΔL , концентрация закаленных вакансий близка к величинам, характерным для предплавильных температур [10]. Существенного изменения субструктуры Pd за время циклов нагрев-охлаждение не происходит.

При ЭХН Рd (рис. 16) до соотношения [H] : : [Pd] = 0.25 имеет место монотонное увеличение длины образца Pd до $L_h = 90 \times 10^{-4}$ (индекс "*h*" означает изменение длины образца при ЭХН, а индекс "*o*" остаточное изменение длины образца после ЭХД водорода). Проведение вышеуказанного эксперимента показало наличие остаточного удлинения образца, равное $L_o = 30 \times 10^{-4}$. Иными словами, плоский образец Pd удлиняется относительно исходного размера.

Это необратимое удлинение L_o после электрохимической десорбции водорода из Pd, вероятно, связано с образованием малоподвижных дефектов кристаллической решетки типа микропустот, микротрещин и дислокаций при наводораживании (в нашем случае плотность дислокаций, рассчитанная по данным ОКР микроискажений составляет >10¹¹ см⁻²), которые не удаляются из решетки во время кратковременного отжига. Это вполне может объяснить появление кавитации на поверхности наводороженного Pd, поскольку вышеуказанные дефекты с наличием микропустот (предположительно, разреженное пространство) вполне могут резко снизить давление в зоне контакта жидкой среды и наводороженного Pd до значения меньше, чем давление насыщенных паров окружающей жидкой среды (для воды это 2.34 гПа или 17.5 мм рт. ст.).

Из дилатометрических данных (рис. 16) можно оценить удельное изменение объема образца Pd при введении в него одного атома водорода во время ЭХН (ΔV_h) или при выведении из него одного атома водорода во время электрохимической десорбции:

$$\Delta V = 3\Delta L V / (Ln),$$

где n — число введенных (удаленных) атомов H, ΔL — изменение длины (ширины, толщины) образца палладия, L — после ЭХН (или после цикла ЭХН + десорбция), V — исходный объем образца. Расчет проводился с учетом изотропности процесса расширения образца, поскольку нами измерялся только параметр ΔL . Величина "n" для каждого случая определялась термодесорбционным методом на параллельном образце или электрохимическим методом во время ЭХД. Данные расчетов сведены в табл. 1.

Из табл. 1 видно, что ΔV_h значительно выше физического объема атома водорода, если при-

[H] : [Pd]	После ЭХН			После ЭХД	
	$n \times 10^{-22}, \mathrm{cm}^{-3}$	ΔL_h , мкм	$\Delta V_h \times 10^3$, Hm^3	ΔL_0 , мкм	$\Delta V_0 \times 10^3$, нм ³
0.25	1.65 ± 0.05	90 ± 3	1.65 ± 0.2	30 ± 3	0.53 ± 0.1
0.46	3.1 ± 0.05	201 ± 3	1.99 ± 0.2	52 ± 3	0.51 ± 0.1
0.61	4.1 ± 0.05	341 ± 3	2.52 ± 0.2	60 ± 3	0.44 ± 0.1
0.76	4.8 ± 0.05	406 ± 3	2.54 ± 0.2	62 ± 3	0.39 ± 0.1

Таблица 1. Изменение удельного объема образца Pd в цикле "электрохимическое наводораживание (ЭХН)электрохимическая десорбция (ЭХД)"

нять за радиус атома водорода расстояние от ядра до оболочки с наиболее вероятным пребыванием электрона (радиус 0.053 нм, объем с таким радиусом 0.62 × 10⁻³ нм³) и значительно ниже, если за радиус атома водорода принять радиус атомной орбитали, то есть сферы, внутри которой электрон пребывает 95% времени. У такого атома радиус будет равен 0.14 нм, а объем — 11.5×10^{-3} нм³ [9].

Анализ литературных данных, проведенный в [1], показал, что усредненное значение ΔV_h (в основном, по данным рентгенографии) составляет 2.9×10^{-3} нм³ и не зависит от концентрации водорода в пределах [H] : [Me] = 0–0.7, типа решетки металла и природы самого металла (исследовались Pd, Ni, Nb, Ta, V, Lu, Tm, Er и сплавы Pd–Ag, Pd–Au, Pd–Pt, Cu–Pd, Cu–Ni, Ni–Mn). В нашем случае ΔV_h приближается к этому значению только для чистой бета-фазы PdH с соотношением [H] : [Pd] > 0.6.

С помощью применяемой нами прецизионной методики измерения линейных размеров образцов Pd удалось рассчитать избыточный деформационный объем ΔV_0 , который остается после ухода водорода из Pd (рис. 16), своего рода отпечаток после пребывания H в Pd. Это остаточное увеличение объема после ЭХД, как уже отмечалось выше, связано с образованием малоподвижных дефектов и необратимо, поскольку кратко-



Рис. 2. Модель кавитационного ядра на наводороженном палладии.

временная термообработка после цикла ЭХН-ЭХД при температуре 600–700°С не приводит к изменению ΔV_0 . С увеличением п возрастает и остаточное удлинение (графа ΔL_o после ЭХД), однако ΔV_0 (последняя графа) с увеличением *n* падает. Следует отметить, что ΔV_0 примерно в 3–6 раз меньше (ΔV_h).

Наиболее правдоподобная и адекватная модель возникновения кавитации в случае или в равной степени стабилизации кавитационных ядер по мнению [3] выглядит модель, предложенная Гарвеем [11] и доработанная Кнаппом [12]. Эта модель разработана для свободных от твердых примесей жидкостей (в нашем случае вода), движущихся вблизи несмачиваемой твердой границы (в нашем случае PdH), на которой могут иметь место не только микроскопические трещины, но и объемные малоподвижные дефекты типа микропустот и дислокаций, которые легко образуются при изменении линейных и объемных размеров Pd при его электрохимическом наводораживании. На рис. 2 схематически изображена модель кавитационного ядра с PdH. Поскольку поверхность трещины несмачиваема и она заполнена, согласно описанию модели, нерастворенным газом, то заходящая в трещину жидкость будет образовывать относительно нерастворенного в жидкости газа выпуклый мениск (то есть отрицательную кривизну по отношению к газовому отсеку трещины), появление которого свидетельствует о снижении давления в трещине, что должно привести либо к стабилизации кавитационных ядер (они не будут растворяться в толще воды), либо к расширению их до пузырьков с последующей кавитацией (то есть бурного выделения пузырьков) в случае нестабильности кавитационного ядра.

Только в отличие от модели Гарвея в нашем случае доступ атмосферного газа в объемные дефекты на PdH закрыт из-за наличия двойного слоя. Однако дефекты мог бы заполнить и водород, выделяющийся при электролизе на PdH, но газообразный водород не определяется (ИК-Фурье-спектроскопия) в воде, в которую выделяется кавитационный газ из PdH. Поэтому с достаточной степенью вероятности следует предположить, что внутри объемных дефектов на PdH имеется в наличии сильноразреженная атмосфера, которая при контакте с водой по модели Гарвея дополнительно понизит давление в кавитационном ядре до давления ниже давления насыщенного пара воды, что вызовет неконтролируемое расширение кавитационных ядер (очень мелких воздушных пузырей), то есть кавитацию.

Условия равновесия (пренебрегая явлением диффузии) пузырька (водная часть кавитационного ядра), содержащего только пары воды, можно записать в виде:

$$P = P_{\rm H} - 2G/R,\tag{1}$$

где P – давление в жидкости, окружающей пузырек; $P_{\rm H}$ – давление насыщенных паров воды (17.5 мм рт. ст. или 2.34 кПа); R – радиус пузырька; G – поверхностное натяжение (для воды G = = 7.4 × 10⁻⁵ кг/см).

Отсюда видно, что рост ядра (кавитация) может начаться только при внешних давлениях, меньших давления насыщения паров воды.

Следует, однако, считать, что в действительности пузырек (кавитационное ядро) кроме паров воды содержит еще и некоторое количество газа. Тогда уравнение равновесия может быть записано в виде:

$$P = P_{\rm H} + P_{\Gamma} - 2G/R, \qquad (2)$$

где P_{Γ} — давление газа внутри пузырька. Предполагая, что температура водяного пара и газов остается неизменной, то давление газа может быть записано в виде:

$$P_{\Gamma} = (P_0 - P_{\rm H} + 2G/R_0) R_0^3 / R^3, \qquad (3)$$

где индекс "0" относится к начальным значениям соответствующей величины. Подставляя (3) в (2) получим выражение для внешнего давления, соответствующего статическому равновесию пузырьков различного радиуса:

$$P = P_{\rm H} + (P_0 - P_{\rm H} + 2G/R_0) R_0^3 / R^3 - 2G/R.$$
 (4)

Из зависимости $P_{\rm H}(R)$ (4) следует, что при давлениях в жидкости, больших $P_{\rm H}$, существует единственное значение радиуса пузырька, соответствующего равновесному положению пузырька (нет кавитации). При наличии растягивающих напряжений выше критических (например, использование водяных насосов, ультразвук, акустические колебания, обтекание препятствий с высокой скоростью) возникает акустическая или гидродинамическая кавитация.

Появление кавитации (с большой степенью вероятности) на поверхности предельно наводороженного PdH (H : Pd = 0.74) связано с образованием в поверхностном слое PdH структуры, близкой к модели Гарвея—Кнаппа и малоподвижных дефектов кристаллической решетки типа микропустот, микротрещин или дислокаций, в которых имеются пустые (возможно, вакуумированные) пространства, газовый состав которых не изучался. Возможно в такой модели давление воды будет не только ниже давления насыщенных паров в случае стабилизации кавитационных ядер, но и значительно ниже, что приведет к неограниченному росту размеров пузырей (то есть к кавитации).

Подпитка кавитационных пузырей воздухом осуществляется с помощью растворенного в воде атмосферного газа (дегазация воды) или через свободную поверхность (контакт атмосферного воздуха с водой). Причем поверхностные слои воды насыщаются воздухом на 75% за несколько секунд, а дальше объемное насыщение и, соответственно, скорость кавитации зависит от коэффициента диффузии газов в жидкости и объемом жидкостей [2].

В [12] использовалась для измерений так называемая "обжатая вода" (перед измерением механической прочности воды следовало воздействие на нее всестороннего давления в 35 атм в течение 10 мин). Было показано, что "обжатая вода" выдерживает заметно большие растягивающие напряжения, чем "необжатая" и к тому же этот эффект очень стоек. Это, по мнению авторов, связано с растворением части кавитационных ядер (очень мелкие воздушные пузыри) под давлением. Было показано [3], что описанная модель Гарвея-Кнаппа [11, 12] соответствует наблюдаемым физическим явлениям.

На рис. 3 представлены зависимости величины удельного электросопротивления (ρ) палладиевого образца от [H] : [Pd] при катодном наводораживании в 1 М NaOH при 20°С (D_k 10 мA/см²). Измерения ρ проводились при кратковременном перенесении палладия в стакан с дистиллированной водой на 200 с.

Согласно полученным данным, при катодном наводораживании до соотношения [H] : [Pd] = 0.25, происходит линейный рост величин ρ , далее ρ плавно увеличивается и достигает практически постоянной величины при [H] : [Pd] = 0.74 (рис. 2). Величина ρ при этом увеличивается в 1.8 раза по сравнению с ρ_0 без наводораживания. При кратковременном переносе и промывке мокрого образца из электрохимической ячейки в стакан с дистиллированной водой для измерения ρ (в течение 200 с) десорбции водорода из палладия практически не наблюдается.

Согласно расчету по данным табл. 1, величина ρ за счет изменения геометрических параметров образца должна незначительно снижаться с 10.4 мкОм см при [H] : [Pd] = 0 до 10 мкОм см при [H] : [Pd] = 0.72–0.75, что не может существенно влиять на величину электросопротивления наводороженных образцов Pd.



Рис. 3. Изменение удельного электросопротивления образца палладия от соотношения [H] : [Pd] при катодном наводораживании в 1 M NaOH при 20°C (D_k 10 мA/см²).

Полученный нами характер зависимостей ρ-[H] : [Pd] при катодном наводораживании в 1 М NaOH и измерении р палладия в дистиллированной воде отличается от приведенных в литературе аналогичных экстремальных зависимостей отсутствием спадающего участка после достижения [H]: [Pd] = 0.74. Так, ранее было установлено [14], что р палладия при 298 К также возрастает примерно в 1.8 раза с увеличением [H] : [Pd] до 0.75-0.8 (при наводораживании при высоких давлениях (24000 атм), но далее зависимость *p*-[H] : [Pd] носит убывающий характер. Описанные результаты в последующем подтверждались другими исследователями. Так в [15] показано, что для фольг из палладия (толщиной 50-100 мкм) после электрохимического наводораживания при 203 К в растворе $C_2H_5OH + H_2SO_4$ (*j* = 50 мA/см²) и быстрого охлаждения до низких температур (для предупреждения десорбции водорода) наблюдается экстремальный характер изотермы (20 К) низкотемпературного удельного сопротивления. Особо интересно то обстоятельство, что максимальным значением р (16 мкОм см) обладает сплав [H] : [Pd] = 0.72, что сопоставимо с полученными нами данными (рис. 3).

выводы

1. Установлено, что изменение линейных и объемных размеров плоских образцов Pd после цикла наводораживание—разводораживание зависит от способа разводораживания. Если разводораживание осуществляется по способу термодесорбции, то наблюдается необратимое уменьшение длины образца относительно исходной. В случае использования электрохимического разводораживания имеет место увеличение объема образца Pd за счет образования малоподвижных дефектов кристаллической решетки типа микропустот, микротрещин и дислокаций, которые не

удаляются из решетки во время кратковременного отжига.

2. Показано, что появление кавитации на наводороженном Pd связано с наличием в поверхностной зоне PdH объемных малоподвижных дефектов таких, как микропустоты, 438 паров воды, вызывая расширение кавитационных ядер (мелкие газовые пузыри) и, соответственно, кавитацию.

3. Показано, что поведение системы PdH с большой степенью вероятности соответствует поведению модельной системы Гарвея—Кнаппа, разработанной для не содержащих твердые частицы жидкостей (в нашем случае вода), омывающих несмачиваемые поверхности, на которых находятся трещины (в нашем случае малоподвижные дефекты в виде микротрещин или микропустот). В результате контакта воды с поверхностью несмачиваемой трещины образуется выпуклый мениск (отрицательная кривизна по отношению к полости, заполненной газом), что способствует еще большему снижению давления внутри модели, повышая вероятность возникновения кавитации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. *Alefeld G., Volkl J.* Hydroqen in Metals 1, Springer-Verlag. Berlin-Heidelberq-New York, 1978. C. 88–89.
- Ефремова К.Д., Пильгунов В.Н. Кавитационные свойства жидкостей // Наука и образование МГТУ им. Н.Е. Баумана. Электрон. журн. 2016. С. 22.
- 3. *Перник А.Д.* Проблемы кавитации. Л: Судостроение, 1966. С. 438.
- 4. *Маргулис М.А.* Звукохимические реакции и сонолюминесценция, М.: Химия, 1986. С. 288.
- 5. Ляхов Б.Ф., Солодкова Л.Н., Ващенко С.В., Бардышев И.И., Котенев В.А., Цивадзе А.Ю. // Физикохимия поверхности и защита материалов. 2019. Т. 55. № 1. С. 108–111.
- Краткий справочник химика / Под ред. член-корр. АН СССР Некрасова Б.В. Москва. Государствен-

ное научно-техническое издательство химической литературы. 1955.

- 7. Ляхов Б.Ф., Солодкова Л.Н., Ващенко С.В., Бардышев И.И., Цивадзе А.Ю., Пуряева В.В., Чернышев В.В. // Теоретические основы химической технологии. 2014. Т. 48. № 6. С. 645-650.
- 8. Ляхов Б.Ф., Бовенко В.Н., Данилов А.И., Урин О.В., Молодкина Е.Б., Загорский В.З., Полукаров Ю.М., Кудрявцев В.Н. // Электрохимия. 1996. Т. 32. № 5. С. 572-578.
- 9. *Уоррен Б.И.* // Успехи физики металлов. М.: ГНТИ по черн. и цв. металлургии, 1963. С. 172.

- Лавренко В.А. Рекомбинация атомов водорода на поверхности твердых тел. Киев. Наук. думка. 1973. С. 143.
- 11. *Химия*: Справ. / Под ред. Шретера В.И. и Лаутеншлегера К.Х. М.: Химия, 1989. С. 85.
- 12. *Harvey E.N.* et al. // J. Applied Physics. 1947. V. 18. P. 162.
- 13. *Knapp R.T.* // Transactions of the ASME. 1958. V. 80. N_{\odot} 6.
- Skoskiewicz T., Baranowski B. // Phys. Stat. Sol. 1969.
 V. 30. P. K33.
- 15. Burger J.P., Senoussi S., Soufache B. // J. Less-Common Met. 1976. V. 49. P. 213.