

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.2.308.01,
СОЗДАННОГО НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
БЮДЖЕТНОГО ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ ВЫСШЕГО
ОБРАЗОВАНИЯ «КАБАРДИНО-БАЛКАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМ. Х.М. БЕРБЕКОВА» МИНИСТЕРСТВА НАУКИ И
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ
УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК**

аттестационное дело № _____
решение диссертационного совета от 11.02.2022 № 1

О присуждении Кармоковой Рите Юрьевне, гражданину Российской Федерации ученой степени кандидата физико-математических наук

Диссертация «Исследование поверхностных явлений в кавитационных пузырьках в расплаве алюминия» по специальности 1.3.8 — Физика конденсированного состояния принята к защите 01.12.2021, протокол № 1, диссертационным советом 24.2.308.01, созданным на базе Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова» Министерства науки и высшего образования РФ, 360004, г. Нальчик, ул. Чернышевского, 173, созданного приказом № 714/нк от 02.11.2012.

Соискатель Кармокова Рита Юрьевна, 1983 года рождения, в 2005 г. окончила ФГБОУ ВО «Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова» по специальности «Микроэлектроника и полупроводниковые приборы», в 2010 г. окончила очную аспирантуру по специальности 01.04.07 – Физика конденсированного состояния ФГБОУ ВО «Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова», с 01.03.2006 работает в КБГУ. На данный момент работает старшим преподавателем кафедры электроники и цифровых информационных технологий Института информатики, электроники и робототехники ФГБОУ ВО «Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова».

Диссертация выполнена на кафедре электроники и цифровых информационных технологий ФГБОУ ВО «Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова».

Научный руководитель – Рехвиашвили Серго Шотович, доктор физико-математических наук, профессор кафедры компьютерных технологий

и информационной безопасности ФГБОУ ВО «Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова».

Официальные оппоненты:

Попель Петр Станиславович, доктор физико-математических наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, профессор кафедры физики, технологии и методики обучения физике и технологии ФГБОУ ВО «Уральский государственный педагогический университет», г. Екатеринбург;

Манукянц Артур Рубенович, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физико-математических дисциплин ФГБОУ ВО «Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет)», г. Владикавказ дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация - научный центр металлургической физики и материаловедения, Удмуртский федеральный исследовательский центр УрО РАН, г. Ижевск в своем положительном отзыве, подписанном руководителем НЦ МФМ УдмФИЦ УрО РАН, доктором физико-математических наук Ладьяновым В.И. и утвержденным директором УдмФИЦ УрО РАН, доктором физико-математических наук, профессором Альесом М.Ю., указала, что диссертационная работа Кармоковой Р.Ю. представляет собой завершенную научно-исследовательскую работу на актуальную тему. Новые научные результаты, полученные диссертантом, имеют существенное значение для физики конденсированного состояния. Выводы и рекомендации достаточно обоснованы. Работа отвечает требованиям п.9-14 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 № 842, предъявляемых к кандидатским диссертациям, а ее автор Кармокова Рита Юрьевна заслуживает присвоения ей ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 – Физика конденсированного состояния.

Соискатель имеет 17 опубликованных работ по теме диссертации, в том числе, из них в рецензируемых научных изданиях, включенных в список ВАК РФ опубликовано 4 работы, 1 работа в МБД Web of Science и Scopus, 1 патент на изобретение.

Наиболее значимые научные работы по теме диссертации:

1. Рехвиашвили, С.Ш. К расчету постоянной Толмена / С.Ш. Рехвиашвили, Е.В. Киштыкова, **Р.Ю. Кармокова**, А.М. Кармоков // Письма в журнал технической физики. – 2007. – Т. 33. – № 2. – С. 1-7.

- Rekhviashvili S.Sh. Calculating the Tolman constant / S.Sh. Rekhviashvili, E.V. Kishtikova, R.Yu. Karmokova, A.M. Karmokov // Technical physics letters – 2007. – V. 33. – N 1. – P. 48-50.
2. **Кармокова, Р.Ю.** Влияние акустического воздействия на расплав алюминия / Р.Ю. Кармокова, С.Ш. Рехвиашвили, А.М. Кармоков // Физика и химия обработки материалов. – 2012. – № 5. – С. 20-26.
 3. **Кармокова, Р.Ю.** Перераспределение примесей в межфазном слое сплава алюминия с кавитационными пузырьками / Р.Ю. Кармокова, А.М. Кармоков // Конденсированные среды и межфазные границы. – 2015. – № 3. – С. 392-398.
 4. **Кармокова, Р.Ю.** Сепарация жидкости в скрещенных электрическом и магнитном полях / Р.Ю. Кармокова, А.М. Кармоков, С.Ш. Рехвиашвили, О.А. Молоканов// Известия Кабардино-Балкарского государственного университета. – 2018. – №2. – С. 30-34.
 5. **Кармокова, Р.Ю.** Взаимосвязь между параметрами ультразвуковых волн и кавитационных пузырьков в жидком алюминии // Р.Ю. Кармокова, А.М. Кармоков, О.А. Молоканов, М.М. Кармоков // Материалы XII международной научно-технической конференции «Микро- и нанотехнологии в электронике». – Нальчик: 2021. – С. 242-248.
 6. ПАТЕНТ РФ №2054388. Кармоков А.М., **Кармокова Р.Ю.**, Гидов Х.Ш., Рехвиашвили С.Ш. Способ очистки жидкости. 28.05.2012. Бюл. №4.

На диссертацию и автореферат поступили отзывы:

1) *положительный отзыв от официального оппонента Попеля Петра Станиславовича*, где имеются замечания:

– внимание диссертанта сосредоточено на кавитационных пузырьках, возникающих в расплаве в результате его ультразвуковой обработки. Однако известно, что основная часть наиболее популярной и опасной примеси водорода находится в жидком алюминии в виде пузырьков, которые захвачены (окклюдированы) в процессе его производства. В диссертации же на с. 35 утверждается буквально следующее: «Процесс адсорбции усложняется и тем, что в жидком металле нет свободных пузырьков газа, а для их появления необходимо приложить дополнительную энергию извне». Между тем эти окклюдированные пузырьки газа являются основным источником газовой пористости металла после кристаллизации. Хотелось бы пожелать диссертанту в ходе последующей работы рассмотреть взаимодействие таких пузырьков с акустическим полем;

– из текста диссертации не ясно, в результате чего первоначально выбран очень чистый реактив марки 4N6, содержащий 99,996 ат.% алюминия превращается в набор кристаллических структур с содержанием основного

компонента не более 93 ат.% (см. табл.3.2-3.5)? Не означает ли это, что в процессе эксперимента происходит интенсивное загрязнение алюминиевого расплава примесями из атмосферы и деталей установки? Неплохо было бы сравнить химсостав алюминия до и после озвучки, раз она предполагает, что посторонние частицы появляются именно из-за УЗО! (раздел 3.4);

– в разделе 2.5 вначале речь идет о зависимости максимального радиуса пузырька от резонансной частоты. А потом, на рис.2.11 вдруг появляется рассчитанная по вышеприведенным формулам зависимость радиуса пузырька просто от частоты УЗ? При чем здесь резонанс?

– по рис. 3.18 видно, что в результате УЗО размер зерен алюминия многократно возрастает. Выходит, УЗО ухудшает структуру алюминия? Как это согласуется с модифицирующим влиянием УЗО, используемым в промышленном производстве?

2) положительный отзыв от официального оппонента Манукянца Артура Рубеновича, где имеются замечания:

– из текста диссертации не ясна возможность использования выражений 3.10 и 3.11 для расчета состава межфазного слоя «расплав-газ», так как непонятно, находится ли система в термодинамическом равновесии;

– на рисунках 3.17 и 3.18 обозначения по осям координат написаны мелким шрифтом и плохо читаются;

– в главе 2 в описании экспериментальной установки геометрические размеры тигля выражены не в системе СИ;

– в некоторых литературных ссылках имеются несоответствие в оформлении по ГОСТу.

3) положительный отзыв от ведущей организации с замечаниями:

– для представленных в работе экспериментальных данных отсутствует оценка погрешности эксперимента;

– в таблице 3.7 на стр. 86 диссертации приведены диапазоны расстояний между пузырьками (L_{\min} - L_{\max}) в алюминии при различных частотах акустического воздействия. Методика расчета данного параметра недостаточно обоснована. Не понятно как выбирались соседние пузырьки, участвующие при расчетах;

– на ряде рисунков с изображением микроструктуры отсутствует либо плохо читается масштабная линейка, в частности, рисунки 2.4, 3.23, 3.24 и т.д.;

– на некоторых рисунках некорректно приведены подрисовочные подписи, например, рис. 3.14 «Участки и точки на поверхности алюминия после акустического воздействия». Согласно тексту диссертации на данном рисунке приведена микрофотография шлифа, вырезанного из объема слитка;

– на стр. 91 при описании рисунка 3.27 отмечено «при значениях радиуса от 0,3 мкм до 800 мкм общая площадь поверхности возрастает больше, чем ...». Согласно рис. 3.27 увеличение радиуса пузырька приводит к уменьшению площади поверхности;

– в работе эмпирически зафиксирована линейная зависимость поверхностного натяжения от температуры плавления вещества, которая приведена на рис. 4.7 (стр. 119). При этом автор диссертации отмечает «Имеющийся на графике разброс точек связан, по-видимому, с неодинаковостью экспериментальных условий, в которых измерялись поверхностное натяжение и температура плавлению». Для подобного предположения необходимо строгое теоретическое обоснование линейной зависимости поверхностного натяжения от температуры плавления;

– формулы для длины Толмена, приведенные в диссертации (формула (4.44)) и автореферате (формула (7)), различаются;

– не указан механизм сохранения кавитационных пузырьков в затвердевшем растворе алюминия после кристаллизации. С прекращением звукового воздействия пузырьки должны были схлопнуться;

– в методике проведения экспериментов не описано каким образом фиксировалась частота генератора и определялась амплитуда колебаний самого графитового излучателя, введенного в расплав;

– в тексте встречаются ошибки стилистического характера, например: «...жидкий расплав ...», «... поверхности, исследовались сканирующим электронным и атомно-силовым микроскопами ...» и т.п.

4) положительный отзыв от Камилова Ибрагимхана Камировича, член-корреспондента РАН, доктора физико-математических наук, профессора, руководителя отдела физики фазовых переходов Института физики им. Х.И. Амирханова Дагестанского федерального исследовательского Центра Российской Академии Наук (Институт физики ДФИЦ РАН) (г. Махачкала). Имеется следующее пожелание:

– в качестве пожелания в дальнейшем хотелось бы продолжение данных исследований закономерностей акустических воздействий при более высоких частотах.

5) положительный отзыв от Козырева Евгения Николаевича, доктора технических наук, профессора, заведующего кафедрой электронных приборов Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет)», (г. Владикавказ). Замечаний не имеется.

6) положительный отзыв от Мошникова Вячеслава Алексеевича, доктора физико-математических наук, профессора, профессора кафедры микро- и наноэлектроники и **Мараевой Евгении Владимировны,** кандидата физико-математических наук, доцента кафедры микро- и наноэлектроники Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), (г. Санкт-Петербург). Имеется следующее замечание:

– несмотря на общее благоприятное впечатление, по работе имеются некоторые замечания. В частности, требуется корректировка изображения на рис. 2 а (на рисунке не очень видны особенности рельефа). На рисунке 4 (3D-изображения) не читаются, а только угадываются подписи осей.

7) положительный отзыв от Филимонова Алексея Владимировича, доктора физико-математических наук, доцента, и.о. ректора Федерального государственного бюджетного учреждения высшего образования и науки «Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет имени Ж.И. Алфёрова Российской академии наук», (г. Санкт-Петербург). Имеется следующее замечание:

– в автореферате отсутствуют данные о сравнении составов микрообъектов на поверхности экспериментальных образцов без флюса и с его добавлением.

8) положительный отзыв от Мирошниковой Ирины Николаевны, доктора технических наук, профессора, заведующего кафедрой электроники и наноэлектроники Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ», (г. Москва). Имеется следующее замечание:

– в качестве замечания хотелось бы отметить типичные для молодых ученых недостатки в формулировании научной новизны: путают процесс (использованные методы исследования, методы оценки и т.п.) и результат исследования, полученный впервые. На основании автореферата я бы сформулировала научную новизну следующим образом:

1. Впервые показано, что акустическое воздействие на расплав алюминия звуковыми волнами с частотами от 1 до 22 кГц и мощностью 400 Вт при температурах от комнатной и до 1300 К способствует перемешиванию солевого флюса с расплавом и возникновению кавитационных пузырьков с радиусом 0,3-3 мкм в тонком пограничном акустическом слое, являющихся эффективными центрами адсорбции примеси (Si, Mg и Zn). Эти поверхностно активные примеси могут быть удалены из расплава

путем введения в расплав адсорбентов или газов.

2. Установлены зависимости радиуса кавитационного пузырька от частоты акустического воздействия и температуры, оценено увеличение температуры внутри кавитационного пузырька с изменением его радиуса в расплаве алюминия.

3. Показано, что с увеличением периода звуковых колебаний и индекса кавитации эквивалентный (усредненный) коэффициент диффузии водорода и магния в расплаве алюминия возрастает в 2,9 раз и 1,43 раз соответственно при значении индекса кавитации 0,3 и частоте 20 кГц.

4. Разработана новая теоретическая модель адсорбции примеси сферическими частицами и кавитационными пузырьками, основанная на применении парного межатомного потенциала Леннарда-Джонса. Построенные согласно этой модели зависимости свободной энергии Гиббса от радиуса кавитационных пузырьков для всех примесей, содержащихся в расплаве алюминия, дают ее положительные значения при радиусах пузырьков 0,27-0,35 мкм.

5. В рамках термодинамического подхода и модели Дебая на основании размерной зависимости поверхностного натяжения кавитационных пузырьков показано, что поверхностное натяжение увеличивается по сравнению с плоской межфазной поверхностью. Это может приводить к усилению процесса адсорбции примеси при малых радиусах кавитационных пузырьков.

Во всех отзывах отмечаются несомненная актуальность и новизна исследования, высокий научный уровень, а также личный вклад диссертанта в разработку темы. Отмеченные недостатки не снижают значимость представленного исследования и носят частный характер.

В отзывах констатируется, что диссертационная работа «Исследование поверхностных явлений в кавитационных пузырьках в расплаве алюминия» соответствует требованиям п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор, Кармокова Рита Юрьевна, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 – Физика конденсированного состояния.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается тем, что:

– официальные оппоненты являются компетентными специалистами в области фундаментального, теоретического и экспериментального исследования физико-химических свойств материалов,

процессов и явлений, протекающих на границах раздела фаз в физических системах при различных агрегатных состояниях, а также компетентны в вопросах разработки физических основ технологии получения материалов с заданными свойствами;

– Научный центр металлургической физики и материаловедения Удмуртского федерального исследовательского центра УрО РАН является широко известным научным центром, специализирующимся в проведении фундаментальных и прикладных научных исследований, и имеющим публикации по тематике диссертации.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

– **представлена** новая экспериментальная установка и методика, позволяющая проводить исследование влияния акустического воздействия на расплав алюминия с частотами 1-22 кГц при высоких контролируемых температурах;

– **впервые проведены** исследования изменения морфологии поверхности алюминия и концентрационного состава кавитационных пузырьков после акустических воздействий при различных частотах, изменения поверхностной плотности кавитационных пузырьков от частоты в расплаве алюминия;

– **получены** новые зависимости эквивалентных (усредненных) коэффициентов диффузии примесей в алюминии от индекса кавитации и частоты акустических волн; влияния частоты акустических волн на средний радиус кавитационных пузырьков, концентрации атомов примесей на суммарной межфазной поверхности «расплав – парогазовая фаза» в расплаве алюминия;

– **проведен расчет** состава межфазной границы «расплав-парогазовая фаза» в кавитационном пузырьке;

– **впервые показано**, что акустическое воздействие на расплав алюминия звуковыми волнами с частотами от 1 до 22 кГц и мощностью 400 Вт при температурах от комнатной и до 1300 К способствует перемешиванию солевого флюса с расплавом и возникновению кавитационных пузырьков с радиусом 0,3-3 мкм в тонком пограничном акустическом слое, являющихся эффективными центрами адсорбции примеси (Si, Mg и Zn). Эти поверхностно активные примеси могут быть удалены из расплава путем введения в расплав адсорбентов или газов;

– **установлено**, что с увеличением периода звуковых колебаний и индекса кавитации эквивалентный (усредненный) коэффициент диффузии водорода и магния в расплаве алюминия возрастает в 2,9 раз и 1,43 раз

соответственно при значении индекса кавитации 0,3 и частоте 20 кГц.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

– **выявлено**, что при воздействии акустических колебаний звуковой и ультразвуковой частоты в слое расплава алюминия толщиной ~ 20–30 мкм вблизи излучателя образуются кавитационные пузырьки, эффективно захватывающие растворенные примеси и способствующие шлакообразованию;

– **предложена** термодинамическая модель межфазных свойств кавитационных пузырьков и рассчитано изменение свободной энергии Гиббса от размера кавитационного пузырька;

– в рамках термодинамического подхода и модели Дебая на основании размерной зависимости поверхностного натяжения кавитационных пузырьков **показано**, что поверхностное натяжение увеличивается по сравнению с плоской межфазной поверхностью. Это может приводить к усилению процесса адсорбции примеси при малых радиусах кавитационных пузырьков.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что полученные экспериментальные данные по временной зависимости концентрации примесей на межфазной границе «расплав-парогазовая фаза» от частоты звуковых волн и индекса кавитации в алюминии могут быть использованы в технологии очистки алюминия. Созданная экспериментальная установка используется в лаборатории для получения алюминия особой чистоты и сплавов с гомогенной структурой для научных исследований и в учебном процессе. Результаты работы активно используются в учебном процессе, в частности для дисциплин «Физика конденсированного состояния» и «Физическая химия материалов и процессов электронной техники». По результатам исследования разработан способ очистки жидкости и получен патент на изобретение.

Оценка достоверности результатов исследования выявила, что результаты диссертационной работы подтверждаются хорошей воспроизводимостью экспериментов в одних и тех же условиях, применением теоретически обоснованных методов расчета межфазных характеристик границы раздела расплава алюминия с парогазовой фазой в кавитационном пузырьке, а также согласием экспериментальных данных с расчетными данными других авторов. Достоверность полученных данных также обеспечена тщательным и многократным исследованием каждого образца на сертифицированном оборудовании с применением широкого комплекса современных взаимодополняющих аттестованных методов. Основные результаты и сделанные выводы неоднократно докладывались и

обсуждались на различных научных семинарах и конференциях.

Личный вклад соискателя состоит в том, что основные результаты диссертационной работы получены автором самостоятельно, либо при его непосредственном участии. Цели и задачи исследования сформулированы совместно с научным руководителем. Автором самостоятельно выполнен основной объем экспериментальных исследований, включая разработку методик экспериментальных измерений, проведение измерений, анализ, обобщение полученных результатов и формулировку выводов. Подготовка публикации проводилась совместно с соавторами.

На заседании 11.02.2022 (протокол № 1) диссертационный совет принял решение присудить Кармоковой Рите Юрьевне учёную степень кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 – Физика конденсированного состояния.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 17 человек, из них 9 докторов наук по специальности 1.3.8 - Физика конденсированного состояния, участвовавших в заседании, из 22 человек, входящих в состав совета, проголосовали: за 16 (один член совета не голосовал, т.к. временно покидал зал заседаний), против 0, воздержавшихся 0.

Председатель диссертационного
совета 24.2.308.01,
д.ф.-м.н., профессор



Х.Б. Хоконов

Ученый секретарь диссертационного
совета 24.2.308.01,
д.ф.-м.н., профессор

А.А. Ахкубеков

14.02.2022 г.