ЯДРО ФИЗИКАСИ ИНСТИТУТИ ҲУЗУРИДАГИ ИЛМИЙ ДАРАЖАЛАР БЕРУВЧИ DSc.02/30.12.2019.FM/T.33.01 РАҚАМЛИ ИЛМИЙ КЕНГАШ

ЯДРО ФИЗИКАСИ ИНСТИТУТИ

АЛИҚУЛОВ ШЕРАЛИ АБДУСАЛОМОВИЧ

НЕЙТРОН НУРЛАНИШИНИНГ ЯДРО РЕАКТОРИ КОНСТРУКЦИОН МАТЕРИАЛЛАРИНИНГ ИССИҚЛИК- ВА ЭЛЕКТРОФИЗИК ХУСУСИЯТЛАРИГА ТАЪСИРИ

01.04.07 – Конденсирланган ҳолат физикаси

Физика-математика фанлари бўйича фалсафа доктори (PhD) диссертацияси АВТОРЕФЕРАТИ

Тошкент – 2020

УДК: 539.107

Физика-математика фанлари бўйича фалсафа доктори (PhD) диссертацияси автореферати мундарижаси

Оглавление автореферата диссертации доктора философии (PhD) по физико-математическим наукам

Contents of the abstract of dissertation of the doctor of philosophy (PhD) on physical and mathematical sciences

Аликулов Шерали Абдусаломович
Нейтрон нурланишининг ядро реактори конструкцион материалларининг иссиқлик ва электрофизик хусусиятларига таъсири……..... 3

Аликулов Шерали Абдусаломович
Влияние нейтронного облучения на тепло- и электрофизические свойства конструкционных материалов ядерного реактора…… 23

Аликулов Шерали Абдусаломович
The effect of neutron radiation on the thermal and electrophysical properties of structural materials of a nuclear reactor …… 43

Эълон қилинган ишлар рўйхати
Список опубликованных работ
List of published works 49

ЯДРО ФИЗИКАСИ ИНСТИТУТИ ҲУЗУРИДАГИ ИЛМИЙ ДАРАЖАЛАР БЕРУВЧИ DSc.02/30.12.2019.FM/T.33.01 РАҚАМЛИ ИЛМИЙ КЕНГАШ

ЯДРО ФИЗИКАСИ ИНСТИТУТИ

АЛИҚУЛОВ ШЕРАЛИ АБДУСАЛОМОВИЧ

НЕЙТРОН НУРЛАНИШИНИНГ ЯДРО РЕАКТОРИ КОНСТРУКЦИОН МАТЕРИАЛЛАРИНИНГ ИССИҚЛИК ВА ЭЛЕКТРОФИЗИК ХУСУСИЯТЛАРИГА ТАЪСИРИ

01.04.07 – Конденсирланган ҳолат физикаси

Физика-математика фанлари бўйича фалсафа доктори (PhD) диссертацияси АВТОРЕФЕРАТИ

Тошкент – 2020

Физика-математика фанлари бўйича фалсафа доктори (PhD) диссертацияси мавзуси Ўзбекистон Республикаси Вазирлар Маҳкамаси ҳузуридаги Олий аттестация комиссиясида B2019.3.PhD/FM183 рақам билан рўйхатга олинган.

Диссертация Ўзбекистон Республикаси Фанлар Академияси Ядро физикаси институтида бажарилган.

Диссертация автореферати уч тилда (ўзбек, рус, инглиз (резюме)) Илмий кенгаш веб-саҳифаси (www.inp.uz) ва «ZiyoNet» ахборот-таълим тармоғида (www.ziyonet.uz) жойлаштирилган.

Илмий раҳбар: **Байтелесов Сапар Акимович**
физика-математика фанлари номзоди,
катта илмий ходим

Расмий оппонентлар: **Джуманов Сафарали**
физика-математика фанлари доктори, профессор

Абдурахманов Гулмурза
физика-математика фанлари доктори, профессор

Етакчи ташкилот: **Ўзбекистон Республикаси Фанлар Академияси**
“Физика-Қуёш” илмий ишлаб-чиқариш бирлашмаси
Физика-техника институти

Диссертация ҳимояси Ядро физикаси институти ҳузуридаги DSc.02/30.12.2019.FM/T.33 рақамли Илмий кенгашнинг 2020 йил «__» _____ соат ____ даги мажлисида бўлиб ўтади. (Манзил: 100214, Тошкент ш., Улуғбек қўрғони, ЯФИ; тел. (+99871)289-31-18; факс (+99871)289-35-65; e-mail: info@inp.uz.

Диссертация билан Ядро физикаси институтининг Ахборот-ресурс марказида танишиш мумкин. (___ _____ рақам билан рўйхатга олинган.) Манзил: 100214, Тошкент ш., Улуғбек қўрғони, ЯФИ; тел. (+99871)289-31-19.

Диссертация автореферати 2020 йил «____»_____да тарқатилди.
(2020 йил «____» _____ даги ____ рақамли реестр баённомаси.)

М.Ю. Ташметов
Илмий даражалар берувчи
илмий кенгаш раиси, ф.-м.ф.д., профессор

С.Б. Игамов
Илмий даражалар берувчи
илмий кенгаш илмий котиби, ф.-м.ф.д.,
катта илмий ходим

И. Нуритдинов
Илмий даражалар берувчи илмий
кенгаш қошидаги илмий семинар раиси,
ф.-м.ф.д., профессор

КИРИШ (фалсафа доктори (PhD) диссертацияси аннотацияси)

Диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурияти. Бугунги кунда атом энергетикаси жаҳон иқтисодиётнинг энг жадал суратлар билан ривожланиб бораётган соҳасига айланди. Самарали энергия манбаи, экологик тозалиги, уран ва торий изотоплари каби хом-ашёнинг нисбатан арзон ва кўплиги ҳамда бутун ишлаб чиқариш жараёнини бошқариш ҳамда хавфсизлик чораларини таъминлаш юқори савияли технологияларни йўлга қўйилганлиги бунга асос бўлмоқда. Дунё олимлари атом электростанцияларининг самарали ва хавфсиз ишлашини таъминлаш мақсадида уларни ташкил этувчи энергоблоклар конструкцион материалларининг радиацияга ва ўта юқори ҳароратларга ҳамда юқори босимларга чидамлигини ошириш устида тинмай илмий изланишлар олиб бораяптилар. Амалда ишлатилаётган атом реакторларининг аксарияти, шу жумладан, Ўзбекистон Республикаси Фанлар академияси Ядро физикаси институтига қарашли ВВР-СМ типдаги илмий тадқиқот реакторининг ҳам фаол зонаси конструкцион материаллари САВ-1 ва АМГ-2 русумли алюминий қотишмалари, ядро ёқилғиларининг ҳимоя қобиқлари эса САВ-1 алюминий қотишмасидан тайёрланган. Химоя қобиғи иссиқлик ажратувчи элементлардан иссиқликнинг тезда чиқиб кетишини таъминлаб туриши билан бирга ядровий парчаланиш маҳсулотларини фаол зонани тўлдириб турувчи сувга чиқиб кетишини олдини олади. Бу ўз навбатида реактор 10 МВт номинал қувват билан ишлаганда реактор фаол зонасида ишловчи материалларининг эриб кетишидан химоя қилади.

Сўнгги вақтларда ядро ёқилғисининг нархи ошиб бориш тенденцияси кузатилмоқда. Ядро ёқилғисидаги уран-235 изотопининг ёниш даражасини ортиши ҳимоя қобиқларининг иссиқлик ўтказувчанлигини аниқлаш масаласини долзарб қилиб қўйди. Ишлатилган ёқилғи қобиқларининг иссиқлик ўтказувчанлигини аниқлаш техник жиҳатдан мураккаб жараён ҳисобланади. Қобиқ таркибидаги моддаларнинг узлуксиз ядровий парчаланиши туфайли узоқ вақт инсоннинг бевосита ишлаши учун ўта хавфли бўлган бета ва гамма ионлантирувчи нурланишнинг мавжудлигидир. Реактор конструкцион материалларининг хусусиятларини тадқиқотлари борасида муҳим ютуқларга эришилган бўлсада, уларда кечадиган радиацион жараёнларнинг қонуниятларини ўрганиш радиацион материалшунослик физикасининг долзарб муаммоларидан биридир.

Республикамизда ядро энергитикасидан тинчлик мақсадида фойдаланишга, шунингдек шу йўналишда дунё миқёсидаги фундаментал ва амалий тадқиқотлар ўтказишга катта эътибор берилмоқда. Мамлакатимиз илм-фани ривожи ҳамда фундаментал тадқиқот натижаларини ҳаётга татбиқ қилиш учун фундаментал тадқиқотларнинг муҳим йўналишлари Ўзбекистонни янада ривожлантириш бўйича 2017-2021 йиллардаги

Ҳаракатлар стратегиясига[1], шунингдек 2019-2029 йилларда Ўзбекистон Республикасида атом энергетикасини ривожлантириш Концепциясига киритилган.

Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2017 йил 7 февралдаги ПҚ-4947-сонли "Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича Ҳаракатлар стратегияси тўғрисида"ги, 2018 йил 27 апрелдаги ПҚ-3682-сонли "Инновацион ғоялар, технологиялар ва лойиҳаларни амалий жорий қилиш тизимларини янада такомиллаштириш чора-тадбирлари тўғрисида" ги, 2018 йил 7 майдаги ПФ-3698-сонли "Иқтисодиёт тармоқлари ва соҳаларига инновацияларни жорий этиш механизмларини такомиллаштириш бўйича қўшимча чора-тадбирлар тўғрисида"ги, 2019 йил 7 майдаги ПП-4165-сонли "Ўзбекистон Республикасида 2019-2029 йилларда атом энергетикасини ривожлантириш концепциясини тасдиқлаш тўғрисида"ги Қарорлари ва ушбу йўналишда қабул қилинган бошқа меъёрий-ҳуқуқий ҳужжатларда белгиланган вазифаларни амалга оширишга ушбу диссертация ишида ўтказилган тадқиқотлар муайян даражада хизмат қилади.

Тадқиқотнинг Ўзбекистон Республикаси фан ва технологиялар тараққиётининг устувор йўналишларига мослиги. Мазкур тадқиқот республика фан ва технологиялари ривожланишининг II. «Энергетика, энергия тежамкорлиги ва муқобил энергия манбалари» устувор йўналиши доирасида бажарилган.

Муаммонинг ўрганилганлик даражаси. Истиқболли юқори ҳароратли ядро реакторлари учун турли хил конструкцион ва углеродли композицион материалларнинг радиацияга чидамлилиги, шунингдек нейтрон нурланишининг ядро ёқилғиларининг хусусиятларига таъсирини ўрганиш бўйича тадқиқотлар жаҳоннинг етакчи илмий марказлари олимлари, жумладан, америкалик (Y.S. Kim, A. Yacout), россиялик (Коноплев К.А., Фридман С.Р., Орлов С.П., В.М. Лебедов, С.Н. Вотинов), қозоғистонлик (О.П. Максимкин, А.В. Яровчук, Л.Г. Турубарова), польшалик (В. Штеке, Т. Вагнер, Е. Хаевска), исроиллик (A. Minitz, A. Shtechman), украиналик (В.Н. Воеводин ва бошқалар), ўзбекистонлик (Р. Ханбеков, М. Сулаймонов, М. Жаматов, Т.Б. Ашрапов, Х. Халилов, И.Х. Абдукадырова) ва бошқа олимлар томонидан олиб борилган.

Бу тадқиқотлар натижасида тез нейтронлар билан нурлантирилганда юқоридаги материаларнинг мустаҳкамлик хусусиятлари, коррозияга чидамлиги ўзгариши аниқланган; 353 К температурада нейтрон нурланишининг юқори оқими (1,3 10^{22} н/см^2) таъсирида САВ-1 қотишмасининг техник эскириши тезлашиши аниқланган; САВ-1 қотишмасининг мустаҳкамлиги нурланиш дозаларига ва кўп жиҳатдан қиздириш хароратларига боғлиқлиги кўрсатилган.

---

[1] 2017 йил 07 февральдаги ПФ-4947-сонли "Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича ҳаракатлар стратегияси тўғрисида" Ўзбекистон Республикаси Президентининг Фармони.

Бироқ бугунги кунга қадар ВВР-СМ типидаги ядро реакторларидаги САВ-1 и АМГ-2 конструкцион алюминий қотишмаларининг иссиқлик ва электрофизикавий хусусиятларига нейтрон нурланишининг таъсир қонуниятлари аниқланмаган, уларни ядровий реакторларда фойдаланишда хавфсиз ишлашининг кафолатига эришилмаган.

Диссертация тадқиқотининг диссертация бажарилган илмий тадқиқот муассасасининг илмий-тадқиқот ишлари режалари билан боғлиқлиги. Диссертация иши Ядро физикаси институти илмий-тадқиқот ишлари режасининг ФА-Ф2-Ф075+Ф070 рақамли “Реактор ва юқори ҳароратли ўта ўтказгич материалларининг ўзига хос электрик, иссиқлик ва техник хоссаларини тадқиқ этиш” (2007-2011), Ф2-ФА-Ф112 рақамли “Ядро материясининг хусусият ва холатларини юқори ва қуйи энергияларда тадкик килиш” (2012–2016) лойиҳалари доирасида бажарилган.

Тадқиқотнинг мақсади нейтрон нурланишининг ядро реактори конструкцион материаллари САВ-1 ва АМГ-2 нинг иссиқлик ва электрофизик хусусиятларига таъсири қонуниятларини ўрганишдан иборат.

Тадқиқотнинг вазифалари:

САВ-1 қотишмасининг иссиқлик ўтказувчанлик коэффициентини ҳароратга ва тез нейтрон флюенсларига боғлиқлигини аниқлаш;

САВ-1 ва АМГ-2 конструкцион материаллари иссиқлик ўтказувчанлигининг умумий миқдорига электрон ташкил этувчиларнинг кўшган ҳиссасини баҳолаш;

САВ-1 конструкцион материалини солиштирма электр ўтказувчанлигининг тез нейтрон флюенслари ва ҳароратга боғлиқлигини аниқлаш;

САВ-1 ва АМГ-2 конструкцион қотишмалари учун Дебай температурасини аниқлаш;

конструкцион қотишмаларнинг Видеман – Франц коэффициентини нейтрон флюенсларига боғлиқлигини аниқлаш.

Тадқиқотнинг объекти сифатида конструкцион материал САВ-1 ва АМГ-2 алюминий қотишмаларининг намуналари олинган.

Тадқиқотнинг предмети САВ-1 ва АМГ-2 алюминий қотишмаларининг электр ва иссиқлик ўтказувчанлиги хисобланади.

Тадқиқотнинг усуллари. Қотишмаларнинг иссиқлик ўтказувчанлиги 290 – 500 К температураларда динамик калориметрда (ИТ-λ-400 қурилмаси) ўлчанди, электр ўтказувчанлиги тўртзондли компенсацион усулида ўлчанди (3207 типидаги микроомметр қурилмаси).

Тадқиқотнинг илмий янгилиги қуйидагилардан иборат:

нейтрон флюенсларининг 10^{16} - 10^{20} н/см^2 оралиғида САВ-1 конструкцион қотишмасининг иссиқлик ўтказувчанлиги радиация таъсири натижасида интерметал фазаларнинг бўлиниши ва САВ-1 қотишмасига легирланган элементларнинг кўпайиши сабабли 20 % га камайиши аниқланган;

САВ-1 ва АМГ-2 қотишмалари учун Дебай температурасининг 406 К ва 408 К га тенглиги аниқланган ва бу соф алюминий учун Дебай температурасига (394 К) яқинлиги кўрсатилган;

САВ-1 ва АМГ-2 конструкцион қотишмаларининг иссиқлик ўтказувчанлиги ва Видеман – Франц коэффициентининг 10^{20} н/см^2 гача бўлган нейтронлар флюенсига чизиқли бўлмаган боғлиқлиги Гинье-Престон зонаси кўринишида матрица билан узвий боғланган қўшимча Mg_2Si фазалар ҳосил бўлиши билан боғлиқ эканлиги аниқланган;

нейтрон билан нурлантирилган САВ-1 қотишмасининг электр қаршилиги 290 К дан 500 К гача бўлган температуралар оралиғида кристалл панжарада ҳосил бўлган нуқсонлар туфайли ташувчиларнинг қўшимча сочилиши ҳисобига ошиши аниқланган.

Тадқиқотнинг амалий натижалари қуйидагилардан иборат:

САВ-1 конструкцион қотишмасининг электр ўтказувчанлигини ўлчаш орқали иссиқлик ажратувчи элементлар ҳимоя деворларининг максимал рухсат этилган температурасини аниқлаш методи ишлаб чиқилган.

Олинган натижаларнинг ишончлилиги кенг доирада электр ўтказувчанликни ва иссиқлик ўтказувчанликни ўлчашда замонавий услубларнинг қўлланилганлиги, шунингдек етарлича статистикага эга бўлган тажрибавий натижаларнинг катта хажми ва олинган натижаларнинг бошқа муаллифлар томонидан олинган натижалар ва хулосаларга зид келмаслиги билан асосланган.

Тадқиқот натижаларининг илмий ва амалий аҳамияти. Тадқиқот натижаларининг илмий аҳамияти шундаки, улар радиацион материалшунослик асосларини ривожланишига ёрдам беради. Хусусан, ўрта ва юқори нейтрон флюенсларида иссиқлик ўтказувчанлик ва электр ўтказувчанлик механизмларини ва уларнинг конструкцион материалларнинг радиацион зарарланишидаги ролини тушунтиришга ёрдам беради.

Тадқиқот натижаларининг амалий аҳамияти ядро ёқилғиларидаги уран-235 нинг максимал ёниш даражасини аниқлашда, реактор фаол зонасидаги максимал рухсат этилган температурасини баҳолашда, шунингдек янги ядро ёқилғиси материалларини яратишда ва ядро қурилмалари учун яхшиланган параметрларга эга янги радиацияга чидамли конструкцион материалларни яратишда фойдаланиши мумкинлиги билан изоҳланади.

Тадқиқот натижаларининг жорий қилиниши. Нейтрон нурланишининг ядро реактори конструкцион материалларининг иссиқлик ва электрофизик хусусиятларига таъсирини ўрганиш асосида:

САВ-1 қотишмасини тез нейтронлар оқими билан 10^{20} н/см^2 гача нурлантирилганда иссиқлик ўтказувчанлик 20% гача камайиш қонунияти ЎзРФА Ядро физикаси институтининг ВВР-СМ илмий тадқиқот реакторида уран-235 нинг максимал ёниш даражасини ва иссиқлик ажратувчи элементнинг максимал рухсат этилган температурасини хисоблашда фойдаланилган (Ўзбекистон Республикаси Фанлар академиясининг 2020 йилнинг 4 февралдаги 2/1255-361-сонли хати). Илмий натижаларнинг

қўлланилиши ядро ёқилғисидаги уран-235 нинг ёниш даражасини 65% гача узайтириш имконини берган;

САВ-1 ва АМГ-2 конструкцион қотишмалар учун Дебай температураси ва САВ-1 конструкцион қотишмасининг иссиқлик ўтказувчанлиги ва Видеман – Франц коэффициентини боғлиқлигини аниқлаш бўйича натижалар ФА-Атех-2018-(175+170) рақамли «ВВР-СМ ядро реакторини параметрларини назорати ва ёқилги даврларини энг кулай шарт-шароитларини методларини ишлаб чикариш» (2018-2020) амалий лойиҳасида фойдаланилган. Илмий натижаларнинг қўлланилиши ВВР-СМ илмий тадқиқот реактори каналларидаги тез нейтронлар оқимининг зичлигини аниқлаш имконини берган;

290 К дан 500 К гача бўлган температуралар оралиғида нейтрон билан нурлантирилган САВ-1 қотишмасини электр қаршилигининг ошиши Корея Республикаси Ханоро реакторида фойдаланилган (Корея Атом энергияси илмий тадқиқот институтининг 2019 йилнинг 2 августдаги хати). Илмий натижаларнинг қўлланилиши нурлантирилган намуналардаги тез нейтронлар флюенсларини аниқлаш имконини берган.

Тадқиқот натижаларининг апробацияси. Тадқиқот натижалари 3 та Халқаро ва 4 та Республика миқёсидаги илмий-амалий анжуманларда муҳокамадан ўтказилган.

Тадқиқот натижаларининг эълон қилиниши. Диссертация мавзуси бўйича жами 14 та илмий иш, шулардан Ўзбекистон Республикаси Олий аттестация комиссиясининг докторлик диссертациялари асосий илмий натижаларини чоп этиш учун тавсия этилган илмий журналларда 4 та мақола, шундан 2 таси хорижий журналларда нашр этилган.

Диссертациянинг тузилиши ва ҳажми. Диссертация кириш, тўртта боб, хулоса ва фойдаланилган адабиётлар рўйхатидан иборат. Диссертациянинг ҳажми 99 бетни ташкил этади.

ДИССЕРТАЦИЯНИНГ АСОСИЙ МАЗМУНИ

Кириш қисмида ўтказилган тадқиқотларнинг долзарблиги ва зарурати асосланган, тадқиқотнинг мақсади ва вазифалари, объект ва предмети тавсифланган, республика фан ва технологиялари ривожланишининг устувор йўналишларига мослиги кўрсатилган, тадқиқотнинг илмий янгилиги ва амалий натижалари баён қилинган, олинган натижаларнинг илмий ва амалий аҳамияти очиб берилган, тадқиқот натижаларини амалиётга жорий қилиш, нашр этилган ишлар ва диссертация тузилиши бўйича маълумотлар келтирилган.

Диссертациянинг “**Алюминий қотишмаларининг физикавий ва кимёвий хоссалари**” деб номланган биринчи бобида адабиётларда эълон қилинган илмий тадқиқот реакторларида конструкцион материал сифатида қўлланилаётган алюминий қотишмаларининг таркиби, структураси ва

хоссалари, шунингдек нейтрон нурланиши (E_n>0,8 *МэВ*) нинг САВ-1 и АМГ-2 алюминий қотишмаларини структураси ва хоссаларига таъсири бўйича тадқиқотлар натижалари келтирилган.

Адабиётларда эълон қилинган ишлар таҳлили асосида тез нейтронлар оқими таъсирида иссиқлик ўтказувчанлик ва электр ўтказувчанлик ўзгариши бўйича ечилмаган муаммолар, тадқиқотнинг мақсад ва вазифалари аниқланган.

Диссертациянинг "**Тадқиқот объектларлари ва тажриба услублари**" деб номланган иккинчи боб алюминий конструкцион қотишмалари бўлган САВ-1 ва АМГ-2 намуналарининг тадқиқот объекти хусусиятларига бағишланган.

Конструкцион материал САВ-1 и АМГ-2 намуналарини тез нейтронлар флюенслари 10^{16} дан 10^{20} н/см^2 гача нурлантириш учун тайёрланишлари келтирилган. Намуналарни нурлантириш учун ЎзР ФА Ядро физикаси институтининг ВВР-СМ илмий тадқиқот реакторининг вертикал каналларидан бирига жойлаштирилди. Бунда реактор фаол зонасининг 3-8 ва 2 чи вертикал каналларидан фойдаланилди. Бу каналларда тез нейтронлар (E_n > 0,8 *МэВ*) оқимининг зичлиги 7,84 $\cdot 10^{12}$ н/(см^2·с) ва 3,3$\cdot 10^{12}$ н/(см^2·с) ни ташкил этди. Каналларнинг температураси 318 К га тенг бўлди. 10 *МВт* қувватда фаол зонадан радиацион қизиш натижасида ажралувчи иссиқлик 1250 м^3/соат хажмли тезлик билан айланувчи сув хисобига чиқарилди.

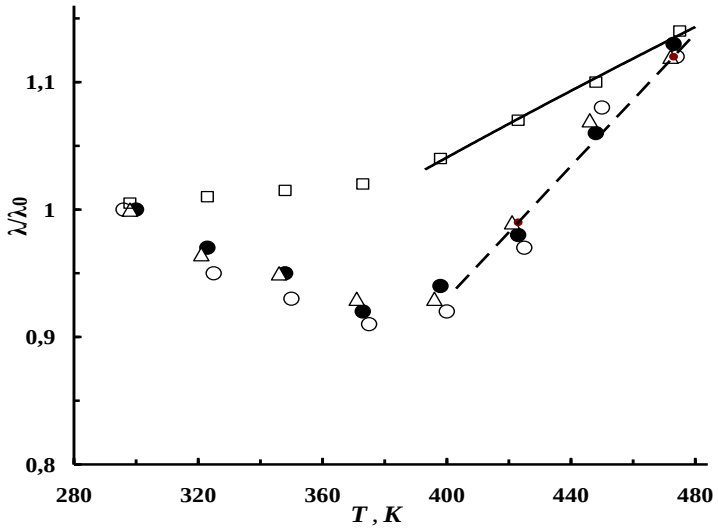
Нурлантирилмаган ва турли хил нейтрон дозаларида нурлантирилган намуналарнинг иссиқлик ўтказувчанлигини ўлчаш динамик калориметри методи асосидаги ИТ-λ-400 қурилмасида, 290 К дан 490 К температуралар оралиғида ўлчанди. Намуналарнинг электр ўтказувчанлиги тўрт зондли компенсацион усули асосида, 290 - 490 К температуралар оралиғида ўлчанди. Иссиқлик ўтказувчанлик коэффициенти ва электр ўтказувчанлигини ўлчаш хатолиги 10% дан ошмади.

Диссертациянинг "**САВ-1 ва АМГ-2 алюминий қотишмаларининг иссиқлик ўтказувчанлиги"** деб номланган учинчи бобида ўрганилаётган намуналаринг иссиқлик ўтказувчанлик тадқиқоти натижалари келтирилган.

САВ-1 алюминий қотишмасининг 290–490 К ҳароратлар оралиғидаги иссиқлик ўтказувчанлик коэффициентини температурага боғлиқлиги, шунингдек солиштириш учун тоза алюминий иссиқлик ўтказувчанлигининг температурага боғлиқлиги 1-расмда кўрсатилган. Солиштириш учун тоза алюминийнинг иссиқлик ўтказувчанлиги хам кўрсатилган. САВ-1 қотишмасининг учта намуналарида тадқиқ қилинган температуралар оралиғидаги иссиқлик ўтказувчанлигининг температурага боғлиқ ўзгариши алюминийникидан фарқ қилади.

1-расмдан кўриниб турибдики, САВ-1 намуналарини иссиқлик ўтказувчанлигининг температурага боғлиқлиги алюминий учун худди шундай боғлиқликлигидан фарқ қилади. Агар алюминийнинг иссиқлик ўтказувчанлиги Дебай температурасидан паст температураларда деярли температурага боғлиқ бўлмаса, САВ-1 қотишмасида у тез камаяди ва Дебай

температурасига яқин жойда минимал даражага тушади. Дебай температурасигача энергия кристалл панжара атомларининг тебранма харакатига сарфланади.



1-расм. Нурлантирилмаган САВ-1 қотишмаси намуналари (•, Δ, ○) ва алюминий (□) иссиқлик ўтказувчанлигининг температурага боғлиқлиги

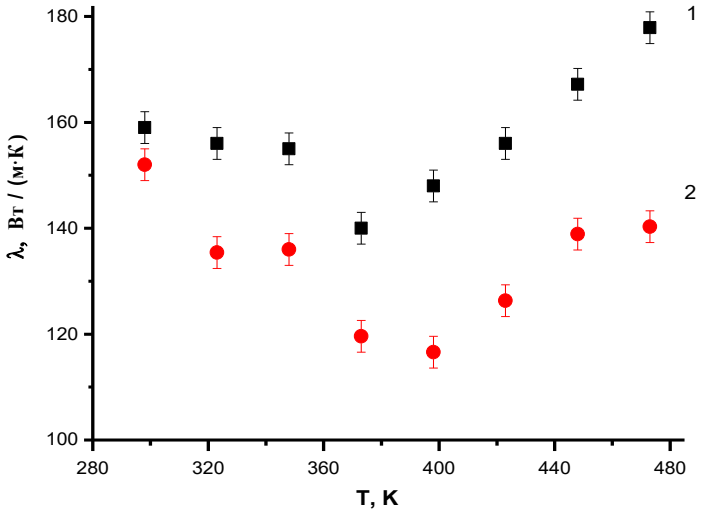
САВ-1 ва АМГ-2 алюминий қотишмаларининг асосий қотишма элементлари кремний ва магний ҳисобланади (1-жадвал).

1 - жадвал

САВ- 1 и АМГ-2 намуналаридаги элементларнинг масса улуши, %

Қотишма	Таркиб, %							
	Асосий таркибий қисмлар			Аралашмалар, ортиқ эмас				
	Al	Mg	Si	Fe	Mn	Cu	Ti	Zn
САВ-1	98,4	1	0,45	0,1	0,01	0,01	0,01	0,02
АМГ-2	97,3	1,85	0,12	0,26	0,04	0,06	0,06	0.04

2-расмда САВ-1 и АМГ-2 алюминий қотишмалари намуналарининг иссиқлик ўтказувчанлигининг температурага боғлиқлиги кўрсатилган.



2-расм. САВ-1 (о) и АМГ-2 (•) қотишмаларини иссиқлик ўтказувчанлигининг температурага боғлиқлиги

2-расмдан кўриниб турибдики, тадқиқ қилинаётган диапазонда САВ-1 и АМГ-2 қотишма намуналарининг иссиқлик ўтказувчанлигининг температурага боғлиқлиги бир хил характерга эга, Дебайнинг характеристик температурасига θ_D яқин температурада энг кам қийматга эга бўлади. Иссиқлик ўтказувчанлик тез камаяди ва минимал қийматга эришади. Дебай температурасидан θ_D юқори температураларда қотишмаларнинг иссиқлик ўтказувчанлиги температурага пропорционал ўсишни бошлайди.

Эксперимент маълумотларини таҳлил қилиш учун кристалл панжаранинг тебранишларини классик назария билан тавсифлаш мумкин бўлган юқори температуралар соҳаси ($T \gg \theta_D$) ва квант механикавий эффектлар билан тавсифланадиган паст температуралар соҳасини ($T \ll \theta_D$) ажратиб турувчи Дебай температураси хисобланди, қуйидаги формулага мувофиқ:

$$\theta_D = \frac{h \cdot u}{2\pi \cdot k} \cdot \left(6\pi^2 n\right)^{1/3} \tag{1}$$

бу ерда h ва k – Планк ва Больцман доимийси, u – ўртача товуш тўлқинининг тезлиги, яъни эластиклик модули орқали аниқланади, n – атомлар концентрацияси.

Тадқиқ қилинган САВ-1 ва АМГ-2 намуналаридаги атомлар концентрацияси n қуйидаги формула ёрдамида аниқланди:

$$n = \sum_{i}^{4} \rho A_i / \mu_i \tag{2}$$

бу ерда μ_i – массанинг A_i улуши билан қотишмага киритилган элементнинг моляр массаси, N_A – Авогадро сони, ρ-қотишма зичлиги.

САВ-1 (406 К) ва АМГ-2 (408 К) қотишмалари учун Дебай температураси деярли бир хил эканлиги хисобланди, бу соф алюминий учун Дебай температурасидан (394 К) бир оз юқори. 2 - расмда кўриниб турибдики, иссиқлик ўтказувчанлик коэффициенти Дебай температурасига якин температураларда ўзгармоқда.

Металлар ва қотишмаларда иссиқлик узатишнинг икки асосий механизми мавжуд: панжараларнинг эластик тебранишлари (фононлар) ва эркин электронлар орқали узатиш. Бунга мувофиқ, иссиқлик ўтказувчанликни шартли панжара $\lambda_р$ ва электрон $\lambda_{эл}$ ўтказувчанликга бўлиш мумкин. Бу ҳолатда электронларнинг нуқсонларда, аралашмаларда ва электронларда сочилиши электронларнинг иссиқлик ўтказувчанлигининг асосий механизми хисобланади ва Видеман-Франц қонунига бўйсунади.

$$\lambda = L\sigma T \tag{3}$$

бу ердаг σ – солиштирма электр ўтказувчанлик; L – Лоренц сони, у кўплаб металлар ва яримўтказгичлар учун қуйидагига тенг:

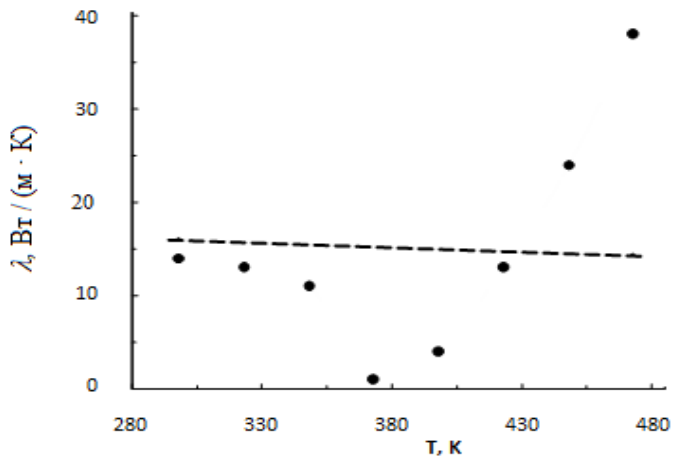
$$L = \left(r + \frac{5}{2}\right)\left(\frac{k}{e}\right)^2, \tag{4}$$

бу ерда r – релаксация вақтининг энергияга боғлиқликлигининг даража кўрсаткичи, яъни электронлар ўтказувчанлигининг сочилиш механизмлари ва бузилиш даражасини аниқлайди. Бундай ҳолда электрон газининг тўлиқ бузилиши ва ташувчиларнинг эластик сочилиши қуйидагига тенг:

$$L = L_0 = (\frac{\pi^2}{3})(\frac{k}{e})^2 \cong 2{,}45 \cdot 10^{-8}\, ВтОмК^{-2}$$

Иссиқлик ўтказувчанлиги ва электр ўтказувчанлиги бўйича маълумотларга асосланиб САВ-1 ва АМГ-2 қотишмалари учун 298 К да Лоренц сони $1{,}87 \cdot 10^{-8}$ Вт·Ом·К$^{-2}$ ва $1{,}85 \cdot 10^{-8}$ Вт·Ом·К$^{-2}$ га тенглиги хисобланди. (4) формулага мувофиқ бундай натижа, r =0 тенг, шунинг учун панжараларнинг акустик тебранишлари билан фақат электронларнинг эластик сочилиши содир бўлади.

3- расмдан кўриниб турибдики, иссиқлик ўтказувчанликнинг панжара ташкил этувчилари $\lambda_р$ (Т) Дебай температурасига яқин температураларда минимум кўринишга эга. Иссиқлик ўтказувчанликнинг электрон ташкил этувчиларининг температурага боғлиқлиги чизиқли характерга эгадир.



3-расм. САВ-1 қотишмасини иссиқлик ўтказувчанлигининг панжара (●) ва электрон (---) ташкил этувчиларининг температурасига боғлиқлиги
(электрон ташкил этувчилари 10 марта кичрайтирилган)

Панжара иссиқлик ўтказувчанликнинг минимум эгри чизиғининг пайдо бўлиши, эҳтимол, Лоренц сонининг Дебай температурасидан паст температураларда r=-0.5 механизмларига мос келадиган қийматлардан кам эканлигини кўрсатади. Бундай таъсир PbTe асосидаги қаттиқ эритмаларда кузатилган ва электрон - электрон тўқнашувларида ноэластик сочилиш билан боғлиқ бўлган. Температуранинг ошиши ва аралашмаларда электронларнинг сочилишининг кўпайишига ноэластик сочилиш механизмини камайишига мос келади. Иссиқлик ўтказувчанликга панжара ташкил этувчиларининг хиссаси сезиларли бўлади, температура ошиши ($T<<\theta_D$) билан дастлаб узун тўлқинли фононлар, Дебай температурасига яқинлашгандан сўнг қисқа тўлқинли акустик ва оптик фононлар уйғона бошлайди. Бизнинг тажрибамизда температуралар оралиғи 298 К дан 498 К гача ўзгарган.

Иссиқлик ўтказувчанликнинг электрон ташкил этувчилари электронларнинг фононлар билан ўзаро эластик таъсири хисобига бир хилда (монотон) камаяди. Натижада, Дебай температурасидан θ_D юқори температураларда панжара иссиқлик ўтказувчанлиги сезиларли бўлади ва фонон ташкил этувчиларига таъсир этувчи омиллар, САВ-1 қотишмасини умумий иссиқлик ўтказувчанлигига температурани таъсирини аниқлаш мумкин.

2-жадвалда нурлантирилмаган ва нурлантирилган намуналарнинг элементлар таркиби тахлили, шунингдек, реактор фаол зонаси температурасига тенг 373 К даги иссиқлик ўтказувчанликнинг ўртача қийматлари кўрсатилган, бу температура реактор фаол зонасидаги иссиқлик ажратувчи йиғилма (ИАЙ) ларнинг химоя қобиқларининг температурасига мос келади.

2 - жадвал

Нурлантирилмаган ва нейтронлар билан нурлантирилган САВ-1 намуналарининг элемент таркиби ва иссиқлик ўтказувчанлиги, Т=298 К

Флюенс, н/см^2	Элементар таркиби (%)						λ_0, Вт/ (м· К)
	Al	Si	Mg	Mn	Fe	Cu	
-	98,27	0,5	1,06	0,01	0,14	0,02	148
10^{17}	97,77	1,1	0,82	0,01	0,28	0,02	140
10^{18}	97,32	1,75	0,62		0,30	0,01	138
10^{19}	97,09	2,05	0,53		0,32	0,01	134
10^{20}	96,86	2,35	0,45		0,33	0,01	122

2- жадвалда кўриниб турганидек, тез нейтронлар билан нурлантириш натижасида САВ-1 қотишмасининг элементар таркиби ўзгаради, шунингдек нуқсонлар пайдо бўлади ва шунинг учун иссиқлик ўтказувчанлик коэффициенти нейтрон флюенслари ошиши билан камаяди.

Трансмутация туфайли (27Al (n, γ) 28Al - 28Si, T1/2 = 2,8 дақиқа, 24Mg+α-28Si+γ) нурлантирилган намунадаги алюминий ва магний миқдори камаяди.

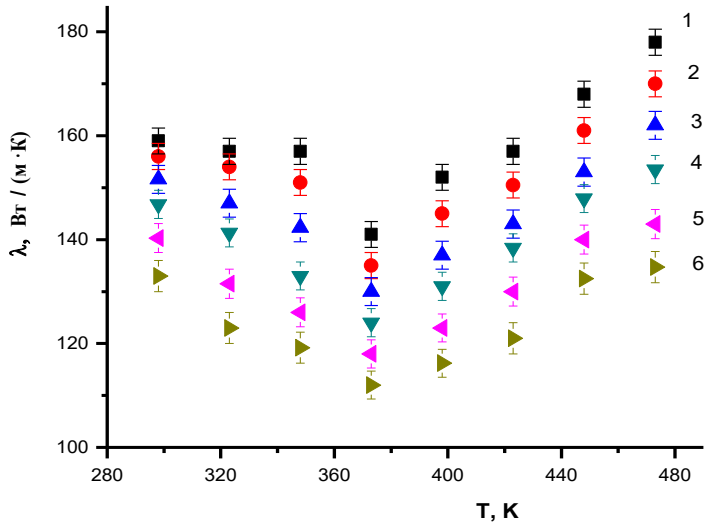
Энг катта ўзгаришлар 10^{20} н/см^2 флюенс билан нурлантирилганда юз беради. Шу билан бирга, таркибдаги кремний хиссаси сезиларли даражада ортади (0,5 % дан 2,35 % гача) ва магнийнинг миқдори камаяди (2 марта), қотишмадаги марганец атомлари ўзгармайди (0,01 %). Қотишманинг иссиқлик ўтказувчанлиги нурланишдан сўнг ўзгаради, нурланиш дозасини ошиши билан ~20% гача камаяди.

Қотишмадаги элементлар концентрацияси ўзгаради:

биринчидан, нейтрон билан нурлантирилганда изотопларнинг трансмутацияси содир бўлади;

иккинчидан, нурланиш натижасида Гинье-Престон зонасида интерметалик фазалар намунада тақсимланади, шунинг учун элементлар концентрацияси ўзгаради.

4-расмда САВ-1 қотишмасининг нурлантирилмаган ва тез нейтронларнинг турли хил флюенсларида нурлантирилган намуналарининг температурага боғлиқлиги келтирилган.



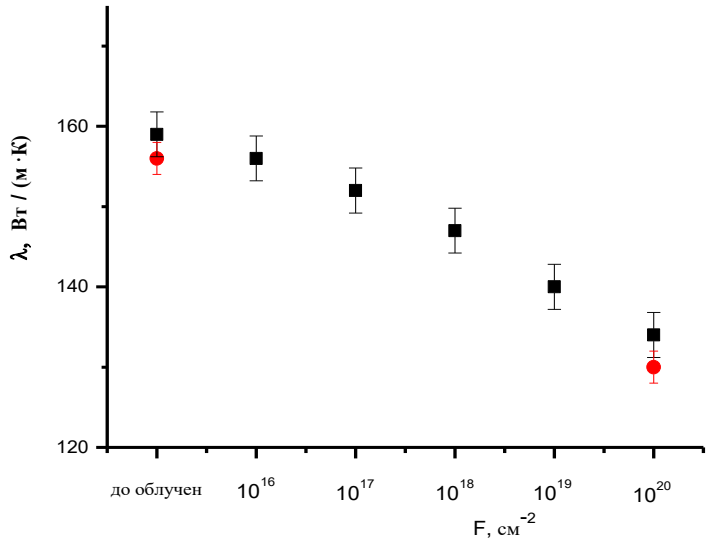
Нурлантирилмаган (1), флюенс 10^{16} н/см^2 (2), флюенс 10^{17} н/см^2 (3), флюенс 10^{18} н/см^2 (4), флюенс 10^{19} н/см^2 (5) ва флюенс 10^{20} н/см^2 (6) лар билан нурлантирилган

4-расм. Нурлантирилмаган ва 10^{16} - 10^{20} н/см^2 флюенсларда нурлантирилган намуналарнинг иссиқлик ўтказувчанлигининг температурага боғлиқлиги

4-расмдан кўриниб турибдики, барча намуналарда Дебай температурасидан юқори температураларда иссиқлик ўтказувчанликнинг ошиши кузатилди (термодинамика қонунларига мувофиқ).

Тадқиқот натижалари шуни кўрсатадики, температура 370 К гача кўтарилганда иссиқлик ўтказувчанлик камаяди. Бу температура реактор номинал қувватда ишлаётганда иссиқлик ажратувчи элементларнинг химоя қобиқларининг юзасидаги қайнаш температураси (~370 К) га яқин. Кейинчалик температуранинг 473 К гача ошиши билан нурлантирилмаган ва барча нурлантирилган (10^{16} дан 10^{20} н/см^2 гача) намуналарнинг иссиқлик ўтказувчанлиги Дебай температурасига яқин минимумларга нисбатан ошади.

5-расмда нурлантирилгандан сўнг намуналарнинг иссиқлик ўтказувчанлигининг тез нейтронлар флюенсига боғлиқлик ўзгариши кўрсатилган.



● *Вотинов С.Н., Шаров Б.В., Ярковой С.В. и др. Ускорение структурных изменений в алюминиевом сплаве под действием реакторного облучения // Дмитровград: Мелекесс, 1970. – 15 С.*

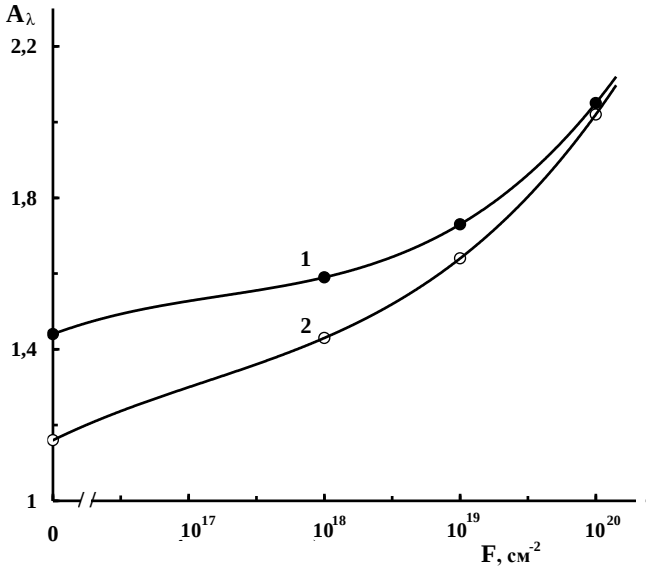
5-расм. Нурлантирилган намуналарнинг иссиқлик ўтказувчанлигини тез нейтронларнинг турли хил флюенслари 10^{16} -10^{20} н/см^2 га боғлиқлиги

5 - расмда кўриниб турибдики, 10^{20} н/см^2 флюенсда нурлантирилган САВ-1 намунасининг иссиқлик ўтказувчанлиги бизнинг тажрибаларимизда 137 В/(м·К), бу Димитровград (Россия) атом реакторлари илмий тадқиқот институтида олинган 133 В/(м·К) натижалар билан таққосланганда ўлчаш хатолиги чегарасида мос келади.

СМ-3 реактори бизнинг ВВР-СМ реакторимиздан нафақат қувватидан, балки нейтронлар оқимининг зичлиги ва нейтронларнинг энергетик спектри билан ҳам фарқ қилади. Бу реакторнинг қуввати 100 МВт ва ядро ёқилғисидаги уран-235 нинг бойитилганлик даражаси 90 % га тенг.

Шундай қилиб, тадқиқ қилинган 10^{16} –10^{20} н/см^2 дозалари оралиқларида иссиқлик ўтказувчанликнинг ўзгаришининг умумий қонуниятлари аниқланди, шунингдек нурлантирилган намуналарда нурланиш дозаларининг ошиши билан иссиқлик ўтказувчанлигининг камайиши кузатилди.

Видеман – Франц коэффициентини (A_λ) нейтронлар флюенсларига боғлиқлигини хисоблаш хона температурасида САВ-1 ва АМГ-2 қотишмаларини нурлантирилмаган ва нурлантирилган намуналарнинг иссиқлик ўтказувчанлигини ва электр ўтказувчанлигини, шунингдек иссиқлик ўтказувчанликнинг электрон ташкил этувчиларини $\lambda_{эл}$ хисоблаш натижалари орқали хисобланди. Хисоблашдаги боғлиқликлар 6-расмда келтирилган.



6-расм. Видеман-Франц коэффициентининг нейтрон флюенсларига боғлиқ , иссиқлик ўтказувчанлик (1) ва электрон ташкил этувчи (2) ларининг ўзгариши. T=300 K

6-расмда келтирилган натижалардан кўриниб турибдики, нурланиш дозаларининг ошиши билан электрон иссиқлик ўтказувчанлик механизмига мос келадиган Видеман-Франц коэффициенти қиймати САВ-1 АМГ-2 қотишмаларининг иссиқлик ўтказувчанлигини деярли тўлиқ аниқлайди, шу билан бирга иссиқлик ўтказувчанликни панжара ташкил этувчиларининг хиссаси камаяди ва жуда кам бўлиб қолади.

Аралашмалар таркибида Si ва Fe атомларининг кўпайиши, шунингдек Гинье-Престон зонаси кўринишида матрица билан узвий боғланган қўшимча Mg_2Si фазалар ҳосил бўлиши янги сочилиш марказларининг пайдо бўлишига олиб келади, бу эса иссиқлик ўтказувчанлик ва электр ўтказувчанликга таъсир қилади.

Диссертациянинг “**САВ-1 қотишмасининг электр ўтказувчанлиги**” деб номланган тўртинчи бобида САВ-1 қотишмасининг солиштирма қаршилигининг температураларга ва нурланиш дозаларига боғлиқлиги бўйича тадқиқ натижалари келтирилган.

Конструкцион материаллар ядровий реакторларда тез нейтронлар оқими, температура ва механик юкланиш таъсиридаги каби мураккаб шароитларда ишлатилади.

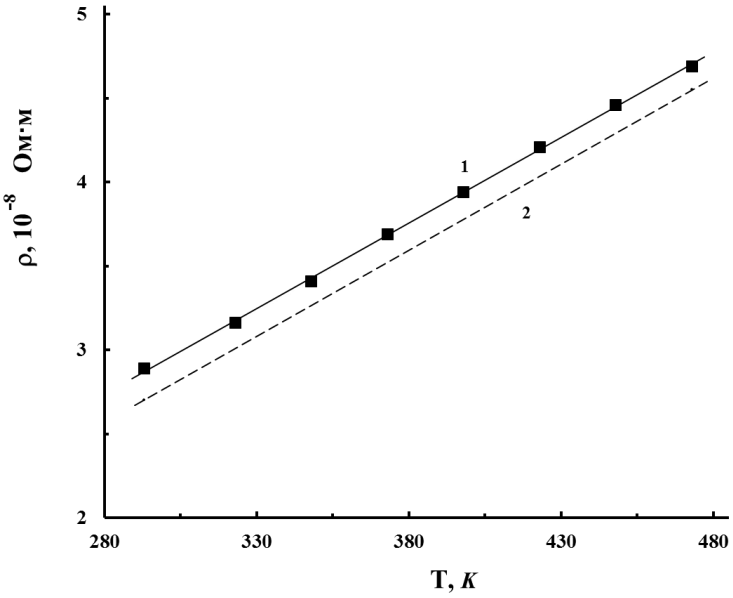
Қотишмалар нурланиш таъсирида турли хил таркибий ўзгаришлар юз беради, шунингдек нурланиш жараёнида материалларнинг хусусиятлари ўзгариши кўп жихатдан уларнинг радиацион зарарланишини аниқлайди. Ушбу жараёнлар нурланиш натижасида хосил бўлган нуқтавий нуқсонларнинг эркин кўчишлари билан бевосита боғлиқ.

Нейтрон нурланиши таъсирида эркин кўчиб юрадиган дефектлар билан бир қаторда вакансия кластерлари хам пайдо бўлади. Радиацион нуқсонларнинг диффузион кўчиш масофаси, уларнинг турига ва нуқтавий

нуқсонларнинг концентрациясига, дислокацияларга, вакансион кластерларга, фазалар орасидаги чегараларга боғлиқ.

Структурага сезгир хусусиятлардан бири, яъни радиация таъсири даражасини аниқлаш мумкин бўлган қийматлардан бири электр ўтказувчанликдир.

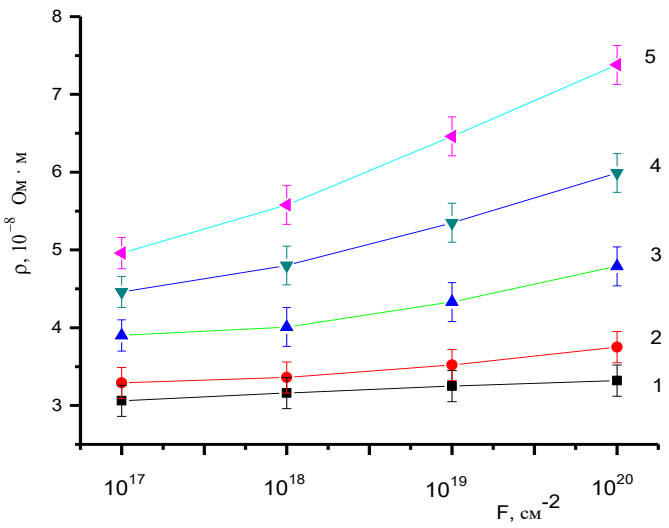
7-расмда алюминий қотишмаси САВ-1 учун солиштирма электр қаршилигининг температурага боғлиқлиги ва солиштириш учун соф алюминий учун солиштирма электр қаршиликнинг температурага боғлиқлиги кўрсатилган. Кўриниб турибдики, тадқиқот доирасида чизиқли боғлиқлиги, аммо солиштирма қаршиликдан фарқ бир оз ~7% (ўлчаш хатолиги 4%), қаршиликнинг температуравий коэффициенти α ($\alpha_{сав-1}$=0,00346, α_{Al}=0,00380) да бир оз фарқ борлигини кузатиш мумкин.



7-расм. САВ-1 (1) қотишмаси ва соф алюминий (2) нинг солиштирма электр қаршилигини температурага боғлиқлиги

Металли қотишмаларда, металларда бўлгани каби заряд ташувчиларнинг концентрацияси температурага боғлиқ эмас. Шунинг учун қотишмаларнинг электр ўтказувчанлигини температурага боғлиқлигини ташувчиларнинг харакатчанлигини температурага боғлиқлиги орқали аниқлаш зарур. Қотишмаларда кристалл панжарасининг даврийлигини иссиқлик тебранишларига қўшимча равишда аралашма атомларининг тартибсиз тақсимланиши хам бузади. Бу заряд ташувчиларнинг қўшимча сочилишига ва уларнинг харакатчанлигини камайишига олиб келади.

САВ-1 қотишмасини солиштирма қаршилигининг температураларга ва нурланиш дозаларига боғлиқлиги тадқиқоти натижалари 8 – расмларда кўрсатилган.



8 - расм. САВ-1 қотишмасининг солиштирма қаршилигини 298 К (1), 323 К (2), 373 К (3), 423 К (4) и 473 К (5) ҳароратларда нейтрон флюенсларига боғлиқлиги

8-расмдан кўриниб турибдики, текширилган нейтрон флюенслари оралиғида САВ-1 қотишмасининг солиштирма қаршилиги хона ҳароратидан юқори бўлган барча ҳароратларда чизиқсиз равишда ўзгаради. Хона ҳароратида у флюенслар билан ўзгармайди (1 боғлиқлик), умумий хисобда 4% ошади. Солиштирма қаршиликнинг энг катта ўзгариши 473 К ҳароратида кузатилади (5 боғлиқлик) ва 30 % ни ташкил этади.

САВ-1 нинг электр ўтказувчанлиги нурланиш доза (оқими) ларига боғлиқ. Нейтрон оқимларининг ошиши билан, нейтронлар ўтганда хосил бўлувчи силжишлар даражаси, тугунлараро атомлар ва вакансияларнинг аннигиляцияси секинлашади. Чунки, тез нейтронлар билан Гинье-Престон зонасидан сочилган аралашма атомлари вакансия кластерларига тушади, уларни барқарорлаштиради ва вакансияларнинг аннигиляциясига таъсир қилади. САВ-1 қобиқ материалининг нурланиш дозаси қанчалик катта бўлса, нурланиш оқими қанчалик кўп бўлса, шунча кўп кристалл панжарада Франкел жуфтлари – вакансиялар ва тугунлараро атомлар хосил бўлади ва улар материалнинг электр ўтказувчанлигини камайтиради.

Маълумки, радиациявий ностабил нуқсонларни икки гурухга бўлиш мумкин – тезкор нуқсонлар, улар нурланишдан сўнг 0,1 секундда аннигиляцияга учрайди, секин нуқсонлар, улар нурланишдан сўнг 35-40 секундда аннигиляцияга учрайди. Нейтрон нурланишидан сўнг 30-40 % нуқсонлар аннигиляцияга учрайди, қолган нуқсонлар электр ўтказувчанликнинг ўзгаришига хиссасини қўшади.

Қотишма ва соф алюминийнинг кристал панжараси орасидаги фарқни осон изоҳлаш мумкин, агар САВ-1 қотишмасини қаттиқ аралашма деб ҳисобланса, чунки кремний ва магний алюминий билан кимёвий бирикма

хосил қилмайди. Шунга мос равишда кремний ва магнийнинг атомлари тугунлар орасига жойлашиб элементар ячейкалар ўлчамларини оширади.

Панжаранинг турли қисмларида қаттиқ аралашманинг элементар ячейкаларининг ўлчамлари турли хил, бунда фақат даврий панжаранинг ўртача қиймати хақида гапириш мумкин (у рентген тадқиқоти ёрдамида ўлчанади).

Қаттиқ аралашма бирикмаларининг панжаравий даврини зичлигини аниқлаш, бу қотишма қандай тузилишга эгалиги хақидаги саволга жавоб топиш имконини беради. Бунинг учун кристалл панжаранинг элементар ячейкасига тўғри келувчи ўртача атомлар сонини *Z* аниқлаш керак.

Ушбу фаразни тасдиқлаш учун соф алюминий ва тадқиқ қилинаётган САВ-1 қотишмаси атомларининг концентрацияси *n* хисобланди (2 формулага асосан). Натижада қотишма ва соф алюминийдаги атомлар концентрацияси мос равишда $6{,}41\times10^{22}$ см$^{-3}$ и $6{,}02\times10^{22}$ см$^{-3}$ га тенг эканлиги аниқланди.

Рентгенографик тахлилидан олинган САВ-1 қотишмасини панжара параметрининг ўртача қиймати $a_{спл}$ дан фойдаланиб кристалл панжаранинг элементар ячейкасига тўғри келувчи ўртача атомлар сонини *Z* аниқлаш мумкин:

$$Z = n \cdot a_{спл}^{\ 3} \qquad (5)$$

(5)-формула бўйича хисоблашлар натижаси шуни кўрсатадики, САВ-1 қотишмасидаги бу сон $Z>4$, яъни томонлари марказлашган кристалл панжараси ячейкасидаги атомлар сони нормал атомлар сонидан кўп. Бу САВ-1 қотишмаси асосан қаттиқ аралашма типи асосида ясалганлиги тўғрисидаги хулосага олиб келади.

ХУЛОСА

“Нейтрон нурланишининг ядро реактори конструкцион материалларининг иссиқлик ва электрофизик хусусиятларига таъсири” мавзусидаги фалсафа доктори (PhD) диссертация ишининг натижалари асосида қуйидаги хулосалар келтирилади:

1. Нейтрон флюенсларининг 10^{16} - 10^{20} н/см^2 оралиғида САВ-1 конструкцион қотишмасининг иссиқлик ўтказувчанлиги радиация таъсири натижасида интерметал фазаларнинг бўлиниши ва САВ-1 қотишмасига легирланган элементларнинг кўпайиши сабабли 20 % га камайиши аниқланган;
2. Дебай температурасидан юқори температураларда САВ-1 ва АМГ-2 қотишмаларининг иссиқлик ўтказувчанлигини панжара ташкил этувчилари температура ортиши билан ошиши, аммо иссиқлик ўтказувчанликнинг электрон ташкил этувчилари асосий бўлиб

сақланиб қолиши аниқланди.

3. САВ-1 ва АМГ-2 қотишмаларида трансмутацион кремний хисобига Гинье-Престон зонаси кўринишида матрица билан узвий боғланган қўшимча Mg_2Si фазалар ҳосил бўлиши кўрсатилди. Бунда узоқ нурланишдан сўнг қотишманинг структуравий ҳолати интерметал фазаларнинг бўлиниши, қотишмаларга легирланган элементлар ва нуқтавий нуқсонлар ҳисобига ўзгаради.
4. САВ-1 ва АМГ-2 қотишмаларини нейтрон оқимларида 10^{20} н/см^2 флюенсгача нурлантирилганда Видеман-Франц коэффициентининг 1,5 марта ошиши аниқланди. Бу коэффициентининг ошиши нейтрон нурланишининг катта дозаларида қотишма намуналарида электронларнинг фононларда ноэластик сочилишига боғлиқ бўлиши мумкин.
5. Нейтрон билан нурлантирилган САВ-1 қотишмасининг электр қаршилиги 290 К дан 500 К гача бўлган температуралар оралиғида температура ошиши билан кристалл панжарада ҳосил бўлган нуқсонлар туфайли заряд ташувчиларнинг қўшимча сочилиши хисобига ошиши аниқланди. Бунда, нейтрон флюенсларинг 10^{20} н/см^2 гача ошиши билан чизиқли боғлиқликдан четлашишига мос равишда, температура ошиши билан қаршилик тезлиги хам ошади.
6. САВ-1 ва АМГ-2 қотишмалари учун Дебай температураларининг 406 К ва 408 К тенглиги аниқланди ва бу соф алюминий учун Дебай температурасига (394 К) яқин.
7. Лоренц сонининг ўзгариши, қотишма иссиқлик ўтказувчанлигини ва электр ўтказувчанлигини нейтрон флюенсларига боғлиқлиги тадқиқ қилинди ва уларнинг ўзаро боғлиқлиги аниқланди. Натижалар материалнинг иссиқлик ўтказувчанлигини электр ўтказувчанликни ўлчаш натижалари бўйича аниқлаш имконини беради.
8. САВ-1 ва АМГ-2 қотишмаларини кристалл панжарасининг бузилишига кремний атомлари ҳисса қўшишини хисобга олган ҳолда 0,04 нм ўртача статик силжиши олинган, бу катталик ёрдамида кристалл панжарада иссиқлик харакати натижасида атомларнинг мувозанат ҳолатидан динамик силжиши билан солиштириш мумкин.

НАУЧНЫЙ СОВЕТ DSc.02/30.12.2019.FM/T.33.01 ПО ПРИСУЖДЕНИЮ УЧЕНЫХ СТЕПЕНЕЙ ПРИ ИНСТИТУТЕ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ

ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ

АЛИКУЛОВ ШЕРАЛИ АБДУСАЛОМОВИЧ

ВЛИЯНИЕ НЕЙТРОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ НА ТЕПЛО- И ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА

01.04.07 – Физика конденсированного состояния

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации доктора философии (PhD) по физико-математическим наукам

Ташкент – 2020

Тема диссертации доктора философии (PhD) по физико-математическим наукам зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Кабинете Министров Республики Узбекистан за номером № B2019.3.PhD/FM183

Диссертация выполнена в Институте ядерной физики Академии наук Республики Узбекистан.

Автореферат диссертации на трех языках (узбекский, русский, английский (резюме)) размещен на веб-странице Научного совета (www.inp.uz) и на Информационно-образовательном портале «ZiyoNet» (www.ziyonet.uz).

Научный руководитель:	**Байтелесов Сапар Акимович** кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник
Официальные оппоненты:	**Джуманов Сафарали** доктор физико-математических наук, профессор
	Абдурахманов Гулмурза доктор физико-математических наук, профессор
Ведущая организация:	**Физико-технический институт Научно-производственное объединение “Физика-Солнце” Академии наук Республики Узбекистан**

Защита диссертации состоится «__» _____ 2020 года в ____ часов на заседании Научного совета DSc.02/30.12.2019.FM/T.33.01 при Институте ядерной физики (Адрес: 100214, г. Ташкент, поселок Улугбек, ИЯФ; тел.: (+998) 71-289-31-18; факс: (+998) 71-289-36-65; e-mail: info@inp.uz).

С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-ресурсном центре Института ядерной физики (регистрационный №_____). Адрес: 100214, г. Ташкент, пос. Улугбек, ИЯФ. Тел. (+99871) 289–31–19).

Автореферат диссертации разослан «__» _____ 2020 г.
(протокол рассылки №_____ от _____ 2020 г.)

М.Ю. Ташметов
председатель Научного совета по присуждению
ученых степеней, д.ф.-м.н., профессор

С.Б. Игамов
ученый секретарь Научного совета по присуждению
ученых степеней, д.ф.-м.н.,
старший научный сотрудник

И. Нуритдинов
председатель научного семинара при
Научном совете по присуждению ученых степеней,
д.ф.-м.н., профессор

ВВЕДЕНИЕ (аннотация диссертации доктора философии (PhD))

Актуальность и востребованность темы диссертации. В настоящее время атомная энергетика представляет собой быстро развивающуюся отрасль мировой экономики. Этому основанием являются такие показатели как высокая эффективность источника энергии, экологичность, наличие богатого и относительно дешевого сырьевого ресурса в виде изотопов урана и тория, а также обеспеченность высокими технологиями управления всем производственным процессом и безопасностью. Ученые всего мира для обеспечения эффективной и безопасной эксплуатации атомных электростанций ведут интенсивные научные исследования по улучшению устойчивости составных конструкционных материалов энергоблоков к радиации, высокотемпературным нагревам и высоким давлениям. Конструкционные материалы активной зоны большинства из функционирующих реакторов, в том числе, и исследовательского реактора типа ВВР-СМ Института ядерной физики Академии наук Республики Узбекистан изготовлены из сплавов алюминия САВ-1 и АМГ-2, а оболочечный материал - из сплава САВ-1. Оболочечный материал обеспечивает теплосъём с ядерного топлива, и служит барьером для удержания продуктов деления от выхода в теплоноситель в виде воды, заполняющей активную зону реактора. Это предохраняет активную зону реактора от расплавления при работе реактора на номинальной мощности 10 МВт.

В последнее время наблюдается тенденция роста цен на ядерное топливо, которая, в свою очередь, поставила на повестку дня вопрос об ещё более эффективном использовании ядерного топлива путем глубокого сжигания изотопа урана-235. Повышение степени выгорания урана-235 в ядерном топливе сделало актуальным определение теплопроводности оболочки ядерного топлива. Измерение теплопроводности оболочки отработанного ядерного топлива является технически трудной задачей. Из-за непрекрашающегося процесса ядерного деления в отработанном ядерном топливе в недрах оболочек продолжаются опасные для жизни человека гамма- и бета- ионизирующие излучения с большой активностью. Несмотря на существенные достижения в исследовании свойств конструкционных материалов реакторов, исследования закономерностей протекания радиационных процессов в них являются одной из актуальных проблем радиационного материаловедения.

В нашей Республике уделяется большое внимание использованию ядерной энергии в мирных целях, а также проведению фундаментальных и прикладных исследований в этом направлении на мировом уровне. Направления этих фундаментальных исследований, имеющих большое значение для развития науки и практического применения в атомной

энергетики нашей страны, отражены в Стратегии[1] действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан на 2017-2021 гг., а также в Концепции развития атомной энергетики в Республике Узбекистан на период 2019-2029 годов.

Исследования, проведенные в данной диссертационной работе, в определенной степени соответствуют задачам, предусмотренным в Указе Президента Республики Узбекистан № УП-4947 «О Стратегии действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан на 2017–2021 гг.» от 7 февраля 2017 года, Постановлениях Президента Республики Узбекистан №ПП-3682 «О мерах по дальнейшему совершенствованию системы практического внедрения инновационных идей, технологий и проектов» от 27 апреля 2018 года, №ПП-3698 «О дополнительных мерах по совершенствованию механизмов внедрения инноваций в отрасли и сферы экономики» от 7 мая 2018 года, № ПП-4165 «Об утверждении концепции развития атомной энергетики в Республике Узбекистан на период 2019-2029 годов» от 7 февраля 2019 г., а также в других нормативно-правовых документах, принятых в данном направлении.

Соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий Республики Узбекистан. Диссертационное исследование выполнено в соответствии с приоритетным направлением развития науки и технологий в Республике Узбекистан II. «Энергетика, энергосбережение и альтернативные источники энергии».

Степень изученности проблемы. Исследования радиационной стойкости различных конструкционных и углеродсодержащих композиционных материалов для перспективных высокотемпературных ядерных реакторов, а также влияния облучения на характеристики ядерных топливных элементов проводились ведущими учеными научно-исследовательских центров мира, в том числе американскими (Y.S. Kim, A. Yacout), российскими (К.А. Коноплев, С.Р. Фридман, С.П. Орлов, В.М. Лебедов, С.Н. Вотинов), казахстанскими (О.П. Максимкин, А.В. Яровчук, Л.Г. Турубарова), польскими (В. Штеке, Т. Вагнер, Е. Хаевска), израильскими (A. Minitz, A. Shtechman), украинскими (В.Н.Воеводин и др.), узбекистанскими (Р.Ханбеков, М. Сулаймонов, М. Жаматов, Т.Ашрапов, Х. Халилов, И. Абдукадырова) и другими специалистами.

В результате этих исследований установлено, что облучение быстрыми нейтронами изменяет прочностные свойства, коррозийную стойкость конструкционных материалов; обнаружен эффект ускорения старения сплава САВ-1 под действием высокого флюенса нейтронного облучения (1,3 10^{22} н/см^2) при температуре 353 К; показано, что прочностные свойства сплава САВ-1 зависят как от дозы облучения, так и, в гораздо большей степени, от температуры нагрева.

---

[1] Указ Президента Республики Узбекистан № УП-4947 «О Стратегии действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан» от 07 февраля 2017 г.

Однако на сегодняшний день не определен механизм воздействия нейтронного облучения на электро- и теплофизические свойства конструкционных материалов САВ-1 и АМГ-2 в ядерных реакторах типа ВВР-СМ, не достигнуты гарантированные безопасные режимы их эксплуатации в ядерных реакторах.

Связь диссертационного исследования с планами научно-исследовательских работ научно-исследовательского учреждения, где выполнена диссертация. Диссертационная работа выполнена в рамках научно-исследовательских проектов Института ядерной физики АН РУз по темам: ФА-Ф2-Ф070+Ф075 «Исследования специфических электрических, тепловых и механических свойств реакторных материалов и высокотемпературных сверхпроводников» (2007–2011), Ф2-ФА-Ф112 «Экспериментальное исследование свойств и состояний ядерной материи при высоких и низких энергиях» (2012–2016).

Целью исследования является установление закономерностей воздействия нейтронного облучения на тепло- и электрофизические свойства конструкционных материалов САВ-1 и АМГ-2 для ядерных реакторов.

Задачи исследования:

установить зависимость коэффициента теплопроводности сплава САВ-1 от температуры и флюенса быстрых нейтронов;

оценить вклад электронной составляющей в общую величину теплопроводности для конструкционных материалов САВ-1 и АМГ-2;

выявить зависимость удельной электропроводности от флюенса быстрых нейтронов и температуры для конструкционного материала САВ-1;

определить температуры Дебая для конструкционных сплавов САВ-1 и АМГ-2;

установить зависимость коэффициента Видемана-Франца конструкционных сплавов от флюенса нейтронов.

Объектом исследования являются образцы конструкционных материалов алюминиевых сплавов АМГ-2 и САВ-1.

Предметом исследования являются электро- и теплопроводность алюминиевых сплавов АМГ-2 и САВ-1.

Методы исследования. Теплопроводность сплавов измерялась динамическим калориметром в диапазоне температур 290 - 500 К (установка ИТ-λ-400), а электропроводность - четырехзондовым компенсационным методом (установка микроомметр типа 3207).

Научная новизна исследования заключается в следующем:

обнаружено радиационно-индуцированное уменьшение теплопроводности конструкционного сплава САВ-1 на 20% в диапазоне флюенса нейтронов 10^{16} - 10^{20} н/см^2, обусловленное дроблением интерметаллической фазы и насыщением сплава САВ-1 легирующими элементами;

определены температуры Дебая для конструкционных сплавов САВ-1 и АМГ-2, равные соответственно 406 К и 408 К, близкие к температуре Дебая

чистого алюминия (394 К);

установлено, что нелинейная зависимость теплопроводности и коэффициента Видемана-Франца конструкционных сплавов САВ-1 и АМГ-2 от флюенса нейтронов до 10^{20} н/см^2 предопределена возникновением дополнительных фаз Mg_2Si в виде зон Гинье-Престона, когерентно связанных с матрицей;

выявлено, что характер роста электрического сопротивления в облученном нейтронами конструкционном сплаве САВ-1 в диапазоне температур от 290 до 500 К вызван дополнительным рассеянием носителей заряда на образованных дефектах в кристаллической решетке.

Практические результаты исследования заключаются в следующем:

разработан метод определения максимально допустимой температуры стенки тепловыделяющих элементовов по измерению электропроводности конструкционного сплава САВ-1.

Достоверность полученных результатов подтверждается использованием апробированных современных методов измерения электропроводности и теплопроводности, а также большим объемом экспериментальных результатов с достаточной статистикой и их согласованностью, непротиворечивостью полученных результатов и выводов с результатами других авторов.

Научная и практическая значимость результатов исследования.

Научная значимость результатов исследования заключается в том, что они вносят вклад в развитие радиационного материаловедения, в частности в объяснение механизмов теплопроводности и электропроводности при средних и высоких значениях флюенсов нейтронов и их роли в радиационных повреждениях конструкционных сплавов.

Практическая значимость результатов исследования заключается в том, что они будут востребованы при определении максимального уровня выгорания U-235 в ядерном топливе, оценке предельно допустимых температур в активной зоне, а также при создании новых ядерных топливных материалов и радиационно-стойких конструкционных материалов с улучшенными параметрами для ядерных установок.

Внедрение результатов исследования. На основе полученных результатов по исследованию влияния нейтронного облучения на тепло- и электрофизические свойства конструкционных материалов ядерного реактора:

выявленная закономерность уменьшения теплопроводности на 20 % при облучении сплава САВ-1 быстрыми нейтронами использована для определения максимально допустимой температуры ТВЭЛа и максимального выгорания U-235 на исследовательском ядерном реакторе ВВР-СМ ИЯФ АН РУ (Письмо Академии наук Республики Узбекистан № 2/1255-361 от 04.02.2020 г.). Использование результатов позволило продлить срок эксплуатации ядерного топлива до 65 % выгорания урана-235;

результаты по определению температуры Дебая для конструкционных

сплавов САВ-1 и АМГ-2 и зависимости теплопроводности и коэффициента Видеман-Франца конструкционного сплава САВ-1 от флюенса нейтронов использованы в рамках научно-исследовательского прикладного проекта ФА-Атех-2018-(175+170) «Разработка методов оптимизации топливных циклов и контроля параметров ядерного реактора ВВР-СМ ИЯФ АН РУ» (2018-2020). (Письмо Академии наук Республики Узбекистан № 2/1255-361 от 04.02.2020 г.). Использование результатов позволило определить плотности потока быстрых нейтронов в каналах исследовательского реактора ВВР-СМ;

выявленный нелинейный характер роста электрического сопротивления в облученном нейтронами конструкционном сплаве САВ-1 в диапазоне температур от 290 до 500 К был использован на реакторе Ханоро Республики Корея (Письмо Корейского исследовательского института атомной энергии от 02.08.2019). Использование результатов позволило определить флюенсы быстрых нейтронов в облучаемых образцах.

Апробация результатов исследования. Результаты исследования были обсуждены на 3 международных и 4 Республиканских научно-практических конференциях.

Опубликованность результатов исследования. По теме диссертации опубликовано 14 научных работ, в том числе 4 статьи в изданиях, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Республики Узбекистан для публикации основных научных результатов докторских диссертаций, из них 2 статьи в зарубежных научных журналах.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы. Объем диссертации составляет 99 страниц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснована актуальность и востребованность темы диссертации, сформулированы цель и задачи, выявлены объект, предмет и методы исследования. Показана связь исследований с основными приоритетными направлениями развития науки и технологий в Республике. Изложена научная новизна исследования, обоснована достоверность полученных результатов, раскрыта их научная и практическая значимость, приведены краткие сведения о внедрении результатов и апробации работы, а также о структуре диссертации.

В первой главе диссертации «**Физико-химические характеристики алюминиевых сплавов**» приводится обзор литературных данных о составе, структуре и свойствах алюминиевых сплавов, используемых в качестве конструкционных материалов в научных исследовательских реакторах, а также результаты исследования влияния нейтронного облучения (E_n>*0,8 МэВ*) на структуру и свойства алюминиевых сплавов САВ-1 и АМГ-2.

На основе анализа литературных данных определена нерешенная проблема изменения теплопроводности и электропроводности в зависимости от флюенса быстрых нейтронов, сформулированы цель и задачи исследования.

Вторая глава диссертации **«Объекты исследования и методика экспериментов»** посвящена характеристикам объектов исследования - конструкционным алюминиевым сплавам САВ-1 и АМГ-2.

Описана процедура подготовки и отжига образцов конструкционных материалов САВ-1 и АМГ-2 для облучения нейтронами в диапазоне флюенсов от 10^{16} до 10^{20} н/см^2. Для облучения быстрыми нейтронами образцы размещались в одном из вертикальных каналов исследовательского реактора ВВР-СМ ИЯФ АН РУз с измененной схемой загрузки при мощности 10 МВт. Использовались вертикальные каналы 3-8 и 2 в активной зоне реактора. Плотность потока быстрых нейтронов (E_n>0,8 *МэВ*) в канале составляла $7{,}84\times10^{12}$ н/(см^2·с) и $3{,}3\times10^{12}$ н/(см^2·с). Температура воды в канале поддерживалась около 318 К. Отвод тепла из активной зоны, выделяющегося вследствие радиационного нагрева при уровне мощности 10 *МВт*, осуществлялся за счет циркуляции дистиллированной воды с расходом 1250 м^3/ч.

Измерения коэффициента теплопроводности в исходных и облученных различными дозами образцах проводились методом динамического калориметра на установке ИТ-λ-400 в диапазоне температур от 290 К до 490 К, измерения электропроводности сплавов четырехзондовым компенсационным методом проводились в диапазоне температур от 290 К до 490 К. Коэффициенты теплопроводности и электропроводности определяли с погрешностью не более 10 %.

В третьей главе диссертации «**Теплопроводность алюминиевых сплавов САВ-1 и АМГ-2**» представлены экспериментальные результаты исследования теплопроводности изучаемых образцов.

Зависимость относительного коэффициента теплопроводности от температуры в трех образцах алюминиевого сплава САВ-1 в диапазоне 290–490 К приведена на рисунке 1. Для сравнения показана также температурная зависимость теплопроводности в чистом алюминии. В исследованном диапазоне температуры во всех трех образцах сплава САВ-1 изменение теплопроводности с температурой отличается от аналогичной зависимости для алюминия.

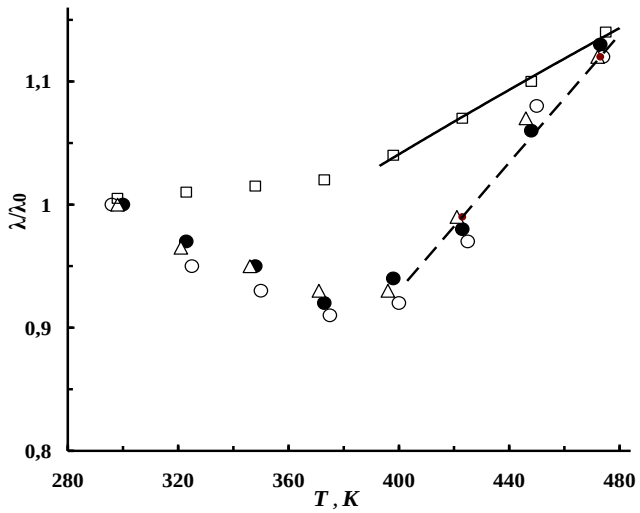


Рис. 1. Зависимость коэффициента теплопроводности необлученных образцов сплава САВ-1 (●, Δ, ○) и алюминия (□) от температуры

Если в алюминии при температуре ниже температуры Дебая теплопроводность почти не зависит от температуры, то в сплаве САВ-1 она быстро уменьшается, достигая минимума в окрестности температуры Дебая. До температуры Дебая часть энергии уходит на возбуждение колебательного движения атомов в кристаллической решетке.

Основными легирующими элементами сплавов САВ-1 и АМГ-2 являются кремний и магний (таблица 1).

Таблица 1

Массовая доля элементов в образцах САВ-1 и АМГ-2,%

Сплав	Состав, %							
	Основные компоненты			Примеси, не более				
	Al	Mg	Si	Fe	Mn	Cu	Ti	Zn
САВ-1	98,4	1	0,45	0,1	0,01	0,01	0,01	0,02
АМГ-2	97,3	1,85	0,12	0,26	0,04	0,06	0,06	0,04

Результаты исследования зависимости коэффициента теплопроводности от температуры в образцах алюминиевых сплавов САВ-1 и АМГ-2 приведены на рисунке 2.

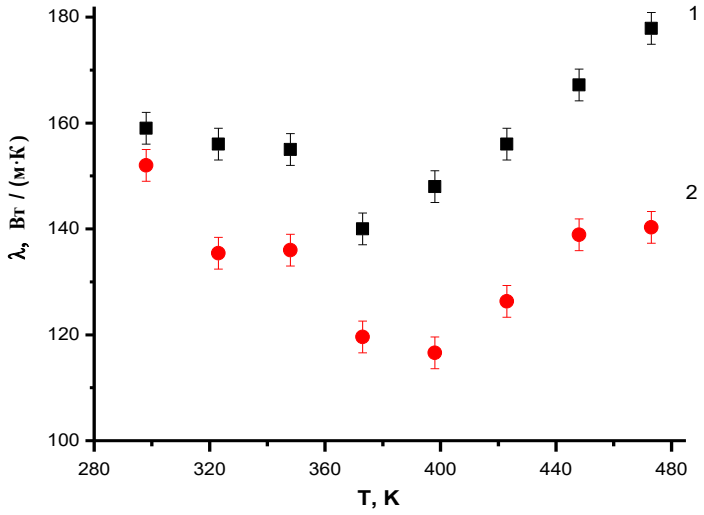


Рис. 2. Зависимость теплопроводности сплавов САВ-1 (о) и АМГ-2 (•) от температуры

На рисунке 2 видно, что в исследованном диапазоне температурная зависимость теплопроводности в образцах сплавов САВ-1 и АМГ-2 имеет одинаковый характер, проходя через минимум при температуре, близкой к характеристической температуре Дебая θ_D. Теплопроводность быстро уменьшается, достигая минимального значения. При температуре выше θ_D теплопроводность сплавов начинает возрастать пропорционально температуре.

Для анализа экспериментальных данных была рассчитана характеристическая температура Дебая θ_D, разделяющая области высокой температуры ($T \geq \theta_D$), в которой колебания кристаллической решетки можно описывать классической теорией и низкой ($T \ll \theta_D$), где существенны квантово–механические эффекты, по формуле

$$\theta_D = \frac{h \cdot u}{2\pi \cdot k} \cdot \left(6\pi^2 n\right)^{1/3} \tag{1}$$

где h и k –постоянные Планка и Больцмана, соответственно, u – средняя скорость звуковых волн, которая определяется через упругие модули, n – концентрация атомов в данном материале.

Концентрацию атомов n в исследованных образцах САВ-1 и АМГ-2 определяли по формуле:

$$n = \sum_i^4 \rho A_i / \mu_i \tag{2}$$

где μ_i – молярная масса элемента, входящего в состав сплава с массовой долей A_i.

В результате расчета получена практически одинаковая величина температуры Дебая для сплавов САВ-1 (406 К) и АМГ-2 (408 К), что несколько выше температуры Дебая для чистого алюминия (394 К). На рис. 2 видно, что коэффициент теплопроводности изменяется при температуре, близкой к температуре Дебая.

В металлах и сплавах возможны два основных механизма переноса тепла: упругие колебания решетки (фононы) и перенос свободными электронами. В соответствии с этим, теплопроводность можно условно разбить на решеточную λ_p и электронную $\lambda_{эл}$. При этом электронная теплопроводность, обусловленная рассеянием электронов на дефектах, примесях, фононах и электронах, является основным механизмом и подчиняется закону Видемана – Франца

$$\lambda = L\sigma T \tag{3}$$

где σ – удельная электропроводность; L – число Лоренца, которое для большинства металлов и полупроводников равно:

$$L = \left(r + \frac{5}{2}\right)\left(\frac{k}{e}\right)^2, \tag{4}$$

где r – показатель степени зависимости времени релаксации от энергии, который определяется механизмом рассеяния и степенью вырождения электронов проводимости. В случае полного вырождения электронного газа и упругого рассеяния носителей $L = L_0 = (\frac{\pi^2}{3})(\frac{k}{e})^2 \cong 2{,}45 \cdot 10^{-8}\, Вт \cdot Ом \cdot К^{-2}$.

На основе данных о теплопроводности и электропроводности, вычисленное число Лоренца для сплавов САВ-1 и АМГ-2 при 298 К оказалось равным $1{,}87 \cdot 10^{-8}$ Вт ·Ом ·К$^{-2}$ и $1{,}85 \cdot 10^{-8}$ Вт ·Ом ·К$^{-2}$. Такой результат, согласно формуле (4), свидетельствует о том, что показатель степени $r = 0$, следовательно, преобладает упругое рассеяние электронов на акустических колебаниях решетки. Из рисунка 3 видно, что решеточная составляющая теплопроводности λ_p(Т) имеет минимум в области температуры, близкой к температуре Дебая. Характер температурной зависимости электронной составляющей теплопроводности линейный.

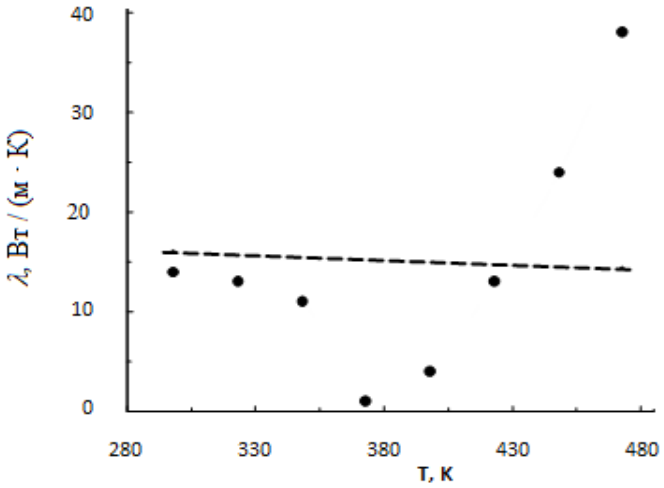


Рис. 3. Зависимость от температуры решеточной (●) и электронной (---) составляющей теплопроводности сплава САВ-1 (Значения электронной составляющей на рисунке уменьшены в 10 раз)

Появление минимума на кривой решеточной теплопроводности указывает, вероятнее всего, на то, что число Лоренца при температурах ниже температуры Дебая, меньше значений, соответствующих его механизмам с r=-0,5. Такой эффект наблюдался в твердых растворах на основе PbTe и связывался с неупругим рассеянием при межэлектронных столкновениях. Было показано, что повышение температуры и соответствующее увеличение рассеяния электронов на примесях уменьшают вклад механизма неупругого рассеяния. Вклад фононной составляющей теплопроводности становится заметным, когда с ростом температуры начинают возбуждаться сначала длинноволновые фононы ($T<<\theta_D$), затем, при приближении к температуре Дебая, и коротковолновые акустические и оптические фононы. В нашем эксперименте температура менялась в диапазоне 298 - 473 К.

Одновременно монотонно уменьшается электронная составляющая теплопроводности за счет упругого взаимодействия электронов с длинноволновыми фононами. В результате при температуре выше температуры θ_D, решеточная теплопроводность растет с ростом температуры, но тем не мене электронная теплопроводность определяет поведение общей теплопроводности сплава САВ-1.

В таблице 2 приведены результаты анализа элементного состава необлученного и облученных нейтронами образцов, в которой представлены также усредненные измеренные значения коэффициента теплопроводности при температуре 373 К, эта температура соответствует средней температуре оболочки тепловыделяющих сборок в активной зоне реактора.

Таблица 2

Элементный состав и коэффициент теплопроводности λ_0 необлученного образца и облученных нейтронами образцов САВ- 1 при Т=373 К

Флюенс, н/см^2	Элементный состав (%)						λ_0, Вт/ (м· К)
	Al	Si	Mg	Mn	Fe	Cu	
-	98,27	0,5	1,06	0,01	0,14	0,02	148
10^{17}	97,77	1,1	0,82	0,01	0,28	0,02	140
10^{18}	97,32	1,75	0,62		0,30	0,01	138
10^{19}	97,09	2,05	0,53		0,32	0,01	134
10^{20}	96,86	2,35	0,45		0,33	0,01	122

Как видно из таблицы 2, элементный состав сплава САВ-1 при облучении быстрыми нейтронами изменяется, а также происходит дефектообразование и поэтому коэффициент теплопроводности уменьшается с увеличением флюенса.

Вследствие трансмутации $27Al+n \rightarrow 28Al+\gamma \rightarrow 28Si$; $24Mg+\alpha \rightarrow 28Si+\gamma$ при облучении количество алюминия и магния уменьшается.

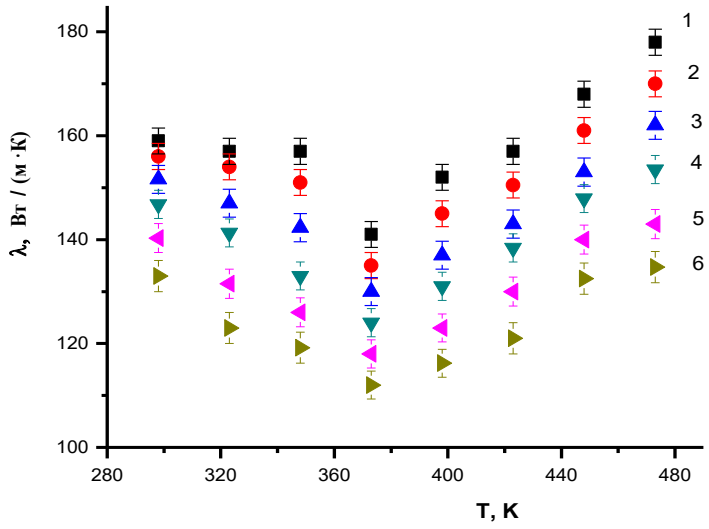
Наибольшие изменения в составе происходят при облучении флюенсом 10^{20} н/см^2: заметно увеличивается доля кремния (с 0,5 % до 2,35 %) и железа (с 0,14 до 0,33 %), но уменьшается количество магния (в 2 раза) и алюминия. Теплопроводность сплава также изменяется при облучении, уменьшаясь примерно на ~20 % с ростом дозы облучения.

Концентрация элементов в сплаве меняется:

во-первых, во время облучения нейтронами происходит трансмутация изотопов;

во-вторых, при облучении локальные нерастворимые интерметаллические фазы в зоне Гинье-Престона раздробляются и рассеиваются по объёму образца, поэтому в измеряемой точке меняется концентрация элементов.

На рисунке 4 приведены зависимости теплопроводности необлученных и облученных разными флюенсами быстрых нейтронов образцов САВ-1 в зависимости от температуры.

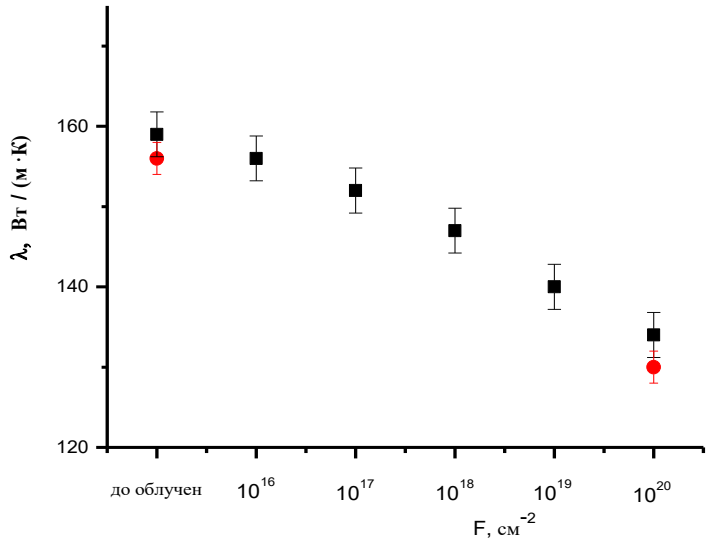


необлученный (1); облученный при флюенсах - 10^{16} н/см^2 (2), 10^{17} н/см^2 (3), 10^{18} н/см^2 (4), 10^{19} н/см^2 (5), 10^{20} н/см^2 (6)

Рис. 4. Зависимость λ(T) образцов до и после облучения нейтронами флюенсом 10^{16} - 10^{20} н/см^2

Как видно из рисунка 4, при всех флюенсах теплопроводность имеет минимум около температуры Дебая, и во всех образцах наблюдается рост теплопроводности выше температуры Дебая (как и положено по термодинамике). Из результатов исследования видно, что теплопроводность уменьшается с повышением температуры до 370 К. Эта температура близка к температуре кипения воды на поверхности ТВЭЛа (САВ-1) (~370 К) при работе реактора на номинальной мощности. При дальнейшем повышении температуры до 473 К в необлучённых и во всех облучённых (с 10^{16} – 10^{20} н/см^2) образцах теплопроводность увеличивается относительно минимума около температуры Дебая.

На рисунке 5. показано изменение теплопроводности образцов после облучения в зависимости от флюенса быстрых нейтронов.



● – *Вотинов С.Н., Шаров Б.В., Ярковой С.В. и др. Ускорение структурных изменений в алюминиевом сплаве под действием реакторного облучения // Препринт, Дмитровград: Мелекесс, 1970. – 15 С.*

Рис. 5. Зависимость теплопроводности образцов САВ-1 облученных разными флюенсами быстрых нейтронов 10^{16} - 10^{20} н/см^2

Из рисунка 5 видно, что наши результаты измерения теплопроводности образца САВ-1 (137 Вт/(м·К)) при флюенсе 10^{20} н/см^2 совпадают в пределах ошибки измерения с полученными в Научно-исследовательском институте атомных реакторов, Димитровград, Россия (133 Вт/(м·К)).

Реактор СМ-3 (Россия) - высокопоточный исследовательский ядерный реактор ловушечного типа с промежуточным спектром нейтронов, с охлаждением активной зоны водой под давлением, тепловая мощностью 100 МВт, имеет ядерное топливо обогащением 90 % по урану-235.

Таким образом, в исследованном интервале доз 10^{16} – 10^{20} н/см^2 выявлена общая закономерность изменения теплопроводности, которая заключается в постепенном радиационно-индуцированном уменьшении теплопроводности по мере увеличения флюенса.

Расчет коэффициента Видемана – Франца A_λ в зависимости от флюенса нейтронов был проведен с использованием результатов по теплопроводности и электропроводности необлученных и облученных образцов сплавов САВ-1 и АМГ-2 при комнатной температуре, а также результатов расчета электронной составляющей теплопроводности $\lambda_{эл}$. Рассчитанные зависимости приведены на рис. 6.

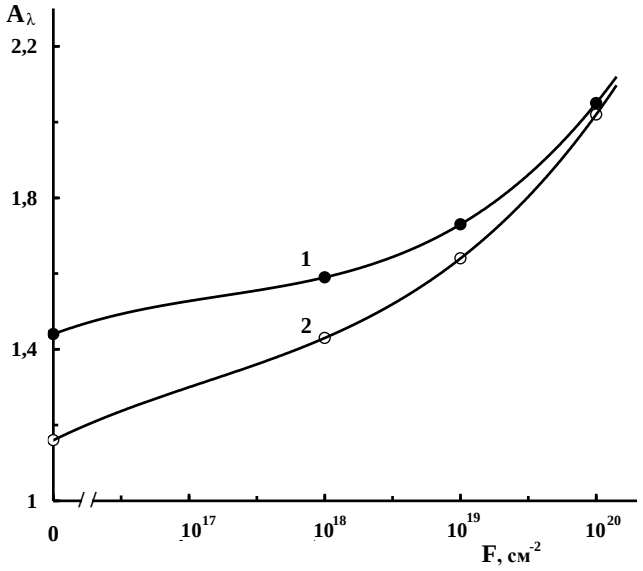


Рис. 6. Изменение коэффициента Видемана-Франца для экспериментально наблюдаемых значений теплопроводности (кривая 1) и электронной составляющей (кривая 2) в зависимости от флюенса нейтронов (1). *T*=300 K

Из представленных на рисунке 6 результатов видно, что с увеличением дозы облучения величина коэффициента Видемана-Франца, соответствующего электронному механизму теплопроводности, практически полностью определяет теплопроводность сплавов САВ-1 и АМГ-2, в то время как вклад решеточной составляющей уменьшается и становится пренебрежимо малым. Рост содержания примесей атомов Si и Fe, а также возникновение дополнительных фаз Mg_2Si в виде зон Гинье-Престона, когерентно связанных с матрицей приводит к образованию новых центров рассеяния, которые влияют на теплопроводность и электропроводность.

В четвертой главе **«Электропроводность САВ-1»** приведены результаты исследования зависимости удельного сопротивления сплава САВ-1 от температуры и дозы облучения.

В сплавах под действием облучения развиваются различные радиационно-индуцированные структурные превращения, которые определяют изменения свойств материалов в процессе облучения и во многом определяют их радиационную повреждаемость. Эти процессы непосредственно связаны со свободной миграцией точечных дефектов, генерируемых облучением. При нейтронном облучении наряду со свободно мигрирующими дефектами возникают также вакансионные кластеры. Диффузионная длина мигрирующих радиационных дефектов зависит от типа и концентрации стоков точечных дефектов, которыми могут служить дислокации, вакансионные кластеры, межфазные границы.

Одной из структурно чувствительных характеристик является электропроводность, величина которой может определять степень радиационного воздействия.

На рисунке 7 показана температурная зависимость удельного электрического сопротивления для алюминиевого сплава САВ-1 и для сравнения приведена аналогичная зависимость для номинально чистого алюминия. Видно, что в исследованном диапазоне наблюдается линейная зависимость, но имеется отличие как удельного сопротивления на ~7 % (при ошибке измерений 4 %), так и температурного коэффициента сопротивления α ($\alpha_{сав\text{-}1}$=0,00346, α_{Al}=0,00380).

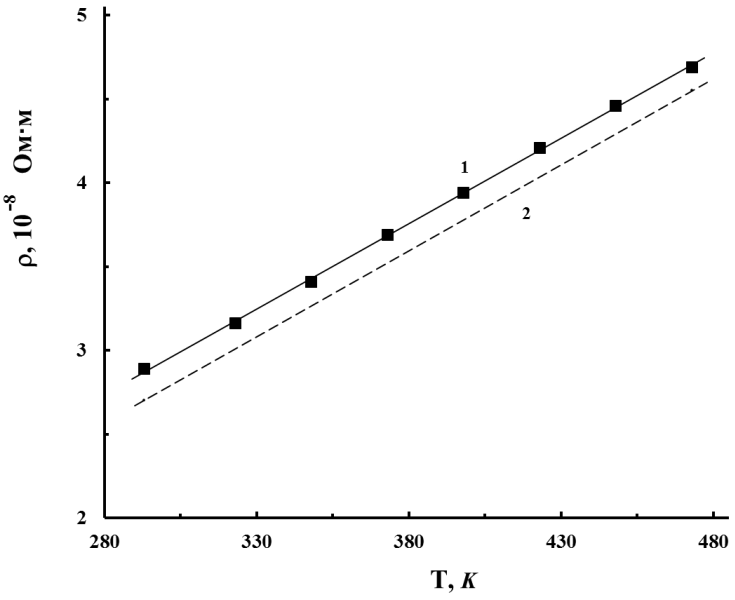


Рис. 7. Температурная зависимость удельного электрического сопротивления сплава САВ-1 (■) и чистого алюминия (--)

В металлических сплавах, как и в металлах, концентрация носителей не зависит от температуры. Поэтому температурная зависимость электропроводности сплавов должна определяться зависимостью подвижности носителей от температуры. В сплавах периодичность потенциала кристаллической решетки, нарушаемая тепловыми колебаниями, дополнительно нарушается беспорядочно распределенными атомами примесей. Это приводит к дополнительному рассеянию носителей заряда и уменьшению их подвижности.

Результаты исследования зависимости удельного сопротивления сплава САВ-1 от температуры и дозы облучения приведены на рисунке 8.

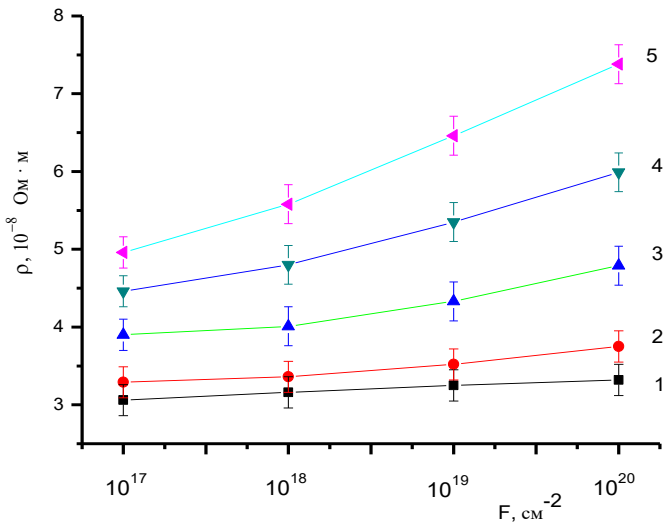


Рис. 8. Зависимость удельного сопротивления сплава САВ-1 от флюенса нейтронов при температурах 298 К (1), 323 К (2), 373 К (3), 423 К (4) и 473 К (5)

Из рисунка 8 видно, что в исследованном диапазоне флюенсов нейтронов удельное сопротивление сплава САВ-1 при всех температурах выше комнатной изменяется нелинейно. При комнатной температуре оно практически не изменяется с флюенсом (зависимость 1), увеличиваясь всего на 4 %. Наибольшее изменение удельного сопротивления наблюдается при температуре 473 К (зависимость 5) и составляет 30%.

Электропроводность САВ-1 зависит от дозы облучения (флюенса). С увеличением флюенса нейтронов, аннигиляция междоузельных атомов и вакансий, образующихся в пиках смещения после прохождения быстрых нейтронов, замедляется, так как примесные атомы, раздробленные быстрыми нейтронами из зоны Гинье-Престона, попадая в вакансионные кластеры, стабилизируют их и препятствуют дальнейшей аннигиляции вакансии. Чем больше флюенс нейтронов при облучении оболочечного материала САВ-1, тем больше образуются в кристаллической решетке пары Френкеля - вакансии и междоузельные атомы, и они уменьшают электропроводность материала. Известно, что радиационные нестабильные дефекты можно разделить на две группы – быстрые дефекты, которые аннигилируют в течение 0,1 секунд после облучения, и медленные дефекты, которые аннигилируют в течение 35-40 секунд. После облучения нейтронами 30-40 % дефектов аннигилируются, а оставшиеся дефекты дают вклад в изменение электропроводности.

Обнаруженное различие между параметрами кристаллической решетки сплава и чистого алюминия легко объясняется, если предположить, что сплав САВ-1 представляет собой твердый раствор внедрения, поскольку кремний и магний не образуют химических соединений с алюминием. Соответственно,

атомы основных легирующих элементов кремния и магния увеличивают размер тех элементарных ячеек, в междоузлиях которых они располагаются.

Поскольку размер элементарной ячейки твердого раствора в разных участках решетки различен, то можно говорить лишь о среднем значении периода (его и измеряют при рентгенографическом исследовании). Определение периода решетки твердого сплава в сочетании с точным измерением плотности позволяет решить вопрос о том, как построен этот сплав. Для этого необходимо определить среднее число атомов *Z*, приходящееся на элементарную ячейку кристаллической решетки.

Была рассчитана концентрация атомов *n* в чистом алюминии и в исследованном сплаве САВ-1:

$$n = N_A \cdot \rho \sum_{1}^{m} \frac{A_i}{\mu_i}, \qquad (5)$$

где N_A – число Авогадро, ρ - плотность сплава, μ_i – молярная масса соответствующего элемента, входящего в состав сплава с массовой долей A_i.

В результате получено, что концентрация атомов *n* в сплаве и в чистом алюминии равна $6{,}41\times10^{22}$ см$^{-3}$ и $6{,}02\times10^{22}$ см$^{-3}$, соответственно.

Используя среднее значение параметра решетки сплава САВ-1 $a_{спл}$=0,0035 К$^{-1}$, полученное из рентгенографического анализа, легко вычислить среднее число атомов *Z*, приходящееся на элементарную ячейку кристаллической решетки этого сплава:

$$Z = n \cdot a_{спл}^{\ 3} \qquad (6)$$

Результаты расчета по формуле (6) показали, что это число в сплаве САВ-1 *Z*>4, то есть больше нормального числа атомов в ячейке гранецентрированной кристаллической решетки. Отсюда следует однозначный вывод, что сплав САВ-1, в основном, построен по типу твердого раствора внедрения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе полученных результатов исследования, проведенного по теме диссертации доктора философии (PhD) «Влияние нейтронного облучения на тепло- и электрофизические свойства конструкционных материалов ядерного реактора», представлены следующие выводы:

1. Обнаружено радиационно-индуцированное уменьшение теплопроводности конструкционного сплава САВ-1 на 20% в диапазоне флюенса нейтронов 10^{16} - 10^{20} н/см^2, обусловленное дроблением интерметаллической фазы и насыщением сплава САВ-1 легирующими элементами.

2. Выявлено, что при температуре выше температуры Дебая θ_D, решеточная теплопроводность сплавов САВ-1 и АМГ-2 растет с ростом температуры, но определяющей остается электронная теплопроводность.
3. Показано, что в сплавах САВ-1 и АМГ-2 за счет трансмутационного кремния возникают дополнительные фазы Mg_2Si в виде зон Гинье-Престона, когерентно связанных с матрицей. При этом структурное состояние сплава после длительного облучения изменяется за счет дробления интерметаллической фазы и насыщения сплавов легирующими элементами и точечными дефектами.
4. Установлено, что при облучении сплавов САВ-1 и АМГ-2 нейтронами до дозы 10^{20} н/см^2 коэффициент Видемана - Франца увеличивается в 1.5 раза. Повышение этого коэффициента может быть связано с неупругим рассеянием электронов на акустических фононах в образцах сплава, подвергнутых большим дозам нейтронного облучения.
5. Выявлено, что характер роста электрического сопротивления в облученном нейтронами конструкционном сплаве САВ-1 в диапазоне температур от 290 до 500 К вызван дополнительным рассеянием носителей заряда на образованных дефектах в кристаллической решетке. При этом с ростом флюенса нейтронов до 10^{20} н/см^2 отклонение от линейной зависимости и, соответственно, скорость роста сопротивления с температурой увеличиваются.
6. Определены температуры Дебая для сплавов САВ-1 и АМГ-2, которые оказались равными 406 К и 408 К соответственно, то есть близкими к температуре Дебая чистого алюминия (394 К).
7. Проведено сравнительное исследование изменения числа Лоренца, теплопроводности и электропроводности в сплаве в зависимости от флюенса нейтронов, выявлена их корреляция. Результаты позволяют определить теплопроводность материала из результатов измерений электропроводности.
8. Учитывая тот факт, что вклад в искажение кристаллической решетки сплавов САВ-1 и АМГ-2 дают атомы кремния, получено среднее статическое смещение, равное 0,04 нм, которое по порядку величины сравнимо с динамическими смещениями атомов из положений равновесия, вызываемыми тепловым движением в кристалле.

SCIENTIFIC COUNCIL DSC.02/30.12.2019.FM/T.33.01 ON AWARD OF SCIENTIFIC DEGREES AT THE INSTITUTE OF NUCLEAR PHYSICS

INSTITUTE OF NUCLEAR PHYSICS

ALIKULOV SHERALI ABDUSALOMOVICH

INFLUENCE OF NEUTRON RADIATION ON THERMAL AND ELECTROPHYSICAL PROPERTIES OF CONSTRUCTION MATERIALS OF THE NUCLEAR REACTOR

01.04.07 – Condensed matter physics

DISSERTATION ABSTRACT
of the Doctor of Philosophy (PhD) on Physical and Mathematical Sciences

Tashkent – 2020

The theme of the dissertation of the doctor of philosophy (PhD) on physical and mathematical sciences was registered by the Supreme Attestation Commission at the Cabinet of Ministers of the Republic of Uzbekistan under number № B2019.3.PhD/FM183

The doctoral (PhD) dissertation was carried out at the Institute of Nuclear Physics of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan.

The abstract of the dissertation was posted in three (Uzbek, Russian, English (resume)) languages on the website of the Scientific Council at www.inp.uz and on the website of "Ziyonet" information and educational portal at www.ziyonet.uz.

Scientific supervisor:	**Baytelesov Sapar Akimovich** Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher
Official opponents:	**Dzhumanov Safarali** Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor
	Abduraxmanov Gulmurza Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor
Leading organization:	**Physical-Technical Institute of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan**

The defense of the dissertation will be held on "____" _____2020 at _____ at the meeting of Scientific Council No. DSc.02/30.12.2019.FM/T.33.01 at the Institute of Nuclear Physics (Address: INP, Ulugbek settlement, 100124 Tashkent city, tel. (+99871)289-31-18; fax: (+99871)289-36-65; e-mail: info@inp.uz).

The doctoral (PhD) dissertation can be looked through in the Information Resource Center of Institute of Nuclear Physics (registered under No. _____) Address: INP, Ulugbek settlement, 100124 Tashkent city. tel. (+99871)289-31-19).

The abstract of dissertation was distributed on «____» _____2020
(Registry record No. ____dated "_____" _____2020

M.Yu. Tashmetov
Chairman of Scientific Council
on award of scientific degree
D.Ph.-M.S., Professor

S.B. Igamov
Scientific Secretary of the Scientific Council
on Award of Scientific Degrees,
D.Ph.-M.S., Senior Researcher

I. Nuritdinov
Chairman of scientific seminar of the Scientific
Council on Award of Scientific Degrees,
D.Ph.-M.S., professor

INTRODUCTION (annotation of PhD dissertation)

Actuality and relevance of the topic of the dissertation. At present, nuclear energy is a rapidly developing branch of the world economy. This is based on such indicators as high efficiency of the energy source, environmental friendliness, the availability of a rich and relatively cheap raw material resource in the form of uranium and thorium isotopes, as well as the provision of high technologies for managing the entire production process and safety. To ensure efficient and safe operation of nuclear power plants, scientists around the world are conducting intensive research to improve the resistance of composite construction materials of power units to radiation, high-temperature heating and high pressures. The construction materials of the active core of most of the operating reactors, including the WWR-SM research reactor of the Institute of Nuclear Physics of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan, are made of SAV-1 and AMG-2 aluminum alloys, and the cladding material is made of SAV-1 alloy. The cladding material provides heat removal from nuclear fuel and serves as a barrier to keep fission products from escaping into the coolant in the form of water filling the reactor core. This protects the reactor active core from melting when the reactor is operating at a rated power of 10 MW.

Recently, there has been a tendency of rising prices for nuclear fuel, which, in turn, has put on the agenda the issue of even more efficient use of nuclear fuel by deep combustion of the uranium-235 isotope. An increase in the degree of uranium-235 burnup in nuclear fuel has made it actual to determine the thermal conductivity of the nuclear fuel cladding. Measuring the thermal conductivity of the cladding of spent nuclear fuel is a technically difficult task. Due to the incessant process of nuclear fission in spent nuclear fuel, gamma and beta-ionizing radiation with high activity, dangerous to human life, continues in the depths of the cladding. Despite significant advances in the study of the construction materials' properties of reactors, studies of the regularities of the course of radiation processes in them are one of the urgent problems of radiation materials science.

The Republic pays great attention to the use of nuclear energy for peaceful purposes and to the conduct of fundamental and applied research in this field at the world level. The directions of this fundamental research, which are of great importance for the development of science and practical application in nuclear energy in our country, are reflected in the Strategy for Further Development of the Republic of Uzbekistan for 2017-2021[1], as well as in the Concept for the Development of Nuclear Energy in the Republic of Uzbekistan for the period 2019-2029.

The research carried out in this dissertation corresponds to a certain extent to the tasks provided for in the Decree of the President of the Republic of Uzbekistan CP-4947 «On the Strategy of Actions for the Further Development of the Republic

[1] Decree of the President of the Republic of Uzbekistan "On the Strategy for the Further Development of the Republic of Uzbekistan" No. 4947 of 07 February 2017.

of Uzbekistan for 2017-2021» of 7 February 2017, Presidential Resolutions CP-3682 «On measures to further improve the system of practical introduction of innovative ideas, technologies and projects» of 27 April 2018, PP-3698 «On additional measures to improve mechanisms of introduction of innovations in the branch and sphere of economy» of May 7, 2018, PP-4165 «On approval of the concept of development of nuclear energy in the Republic of Uzbekistan for the period 2019-2029» of February 7, 2019, as well as in other legal documents adopted in this direction.

Conformity of research to priority directions of development of science and technologies of the Republic of Uzbekistan. The dissertation study was carried out in accordance with the priority area of development of science and technology in the Republic of Uzbekistan - II. «Energy, energy saving and alternative energy sources».

Degree of study of the problem. Studies of the radiation resistance of various construction and carbon-based composite materials for prospective high-temperature nuclear reactors, as well as the effects of radiation exposure on the characteristics of nuclear fuel cells, have been conducted by leading scientists Research centres of the world, including American (Y.S. Kim, A. Yacout), Russian (K.A. Konoplev, S.R. Friedman, S.P. Orlov, V.M. Lebedov, S.N. Votina), Kazakh (O.P. Maximkin, A.V. Yarov, L.G. Turubarova), Polish (V. Steke, T. Wagner, E. Hayevska), Israeli (A. Minitz, A. Shtechman), Ukrainian (V.N.Vojvodina, etc.), Uzbek (R.Khanbekov, M. Sulaymonov, M. Zhamatov, T. Ashrapov, H. Khalilov, I. Abdukadyrova) and other specialists.

As a result of these studies, it was established that irradiation with fast neutrons changes the strength properties, corrosion resistance of construction materials; the effect of accelerating the aging of the SAV-1 alloy under the action of a high fluence of neutron irradiation ($1.3 \cdot 10^{22}$ n / cm^2) at a temperature of 353 K was found, it was shown that the strength properties of the SAV-1 alloy depend both on the radiation dose and, in a much higher degree, on the heating temperature.

However, to date, no mechanism has been defined for the effects of neutron irradiation on the electrical, thermal and thermophygienic properties of SAV-1 and AMG-2 construction materials at the WWR-SM type nuclear reactors, guaranteed safe modes of their operation in nuclear reactors have not been achieved.

Connection of dissertation research with the plans of scientific research works of the scientific research institution, where the dissertation was conducted. The dissertation work was carried out within the framework of research projects of the Institute of Nuclear Physics AS RUz on topics: FA-F2-F070+F075 «Studies of specific electrical, thermal and mechanical properties of reactor materials and high temperature superconductors» (2012-2016) F2-FA-F112 «Experimental study of properties and states of nuclear matter at high and low energies» (2012-2016).

The aim of the study is to establish the regularities of the effect of neutron irradiation on thermal and electrophysical properties of SAV-1 and AMG-2 construction materials for nuclear reactors.

The tasks of the research:

to establish the dependence of the SAV-1alloy thermal conductivity coefficient on temperature and on the fluence of fast neutrons;

assess the contribution of the electronic component to the total value of thermal conductivity for SAV-1 and AMG-2 construction materials;

to reveal the dependence of the electrical conductivity on the fast neutron fluence and temperature for the SAV-1 construction material;

determine the Debye temperatures for structural alloys SAV-1 and AMG-2;

to establish the dependence of the Wiedemann-Franz coefficient of construction alloys on the neutron fluence.

The object of the research is samples of construction materials of aluminum alloys AMG-2 and SAV-1.

The subject of research is the electrical and thermal conductivity of aluminum alloys AMG-2 and SAV-1.

Method of research. The thermal conductivity of the alloys was measured with a dynamic calorimeter in the temperature range of 290 - 500 K (IT-λ-400 setup), and the electrical conductivity was measured by a four-probe compensation method (microohmmeter type 3207).

The scientific novelties of the research are as follows:

a radiation-induced decrease in the thermal conductivity of the SAV-1 constructionl alloy by 20% in the neutron fluence range of 10^{16} - 10^{20} n / sm^2, caused by the fragmentation of the intermetallic phase and saturation of the SAV-1 alloy with alloying elements, was found;

Debye temperatures were determined for construction alloys SAV-1 and AMG-2, equal to 406 K and 408 K, respectively, close to the Debye temperature of pure aluminum (394 K);

it was found that the nonlinear dependence of the thermal conductivity and the Wiedemann-Franz coefficient of the SAV-1 and AMG-2 construction alloys on the the up to 10^{20} n/sm^2 neutron fluence is predetermined by the appearance of additional Mg_2Si phases in the form of Guinier-Preston zones coherently connected with the matrix;

it has been shown that the growth electrical resistance in the neutron-irradiated constructural alloy SAV-1 in the temperature range from 290 K to 500 K is caused by the additional dispersion of charge carries on the formed defects in the crystal lattice;

Practical results of the research are as follows:

a method has been developed for determining the maximum permissible temperature of the wall of fuel rods by measuring the electrical conductivity of the SAV-1 construction alloy.

The reliability of the research results obtained is confirmed by the use of proven modern methods for measuring electrical conductivity and thermal

conductivity, as well as a large volume of experimental results with sufficient statistics and their consistency and consistency of the results and conclusions with the results of other authors.

Scientific and practical significance of the results of research. The scientific significance of the research results lies in the fact that they contribute to the development of radiation materials science, in particular, to the explanation of the mechanisms of thermal conductivity and electrical conductivity at medium and high neutron fluences and their role in radiation damage to construction alloys.

The practical significance of the research results is that they will be required in determining the maximum burn-up level of U-235 in nuclear fuel, estimating the maximum permissible temperatures in the core, and the development of new nuclear fuel materials and radiation-resistant construction materials with improved parameters for nuclear installations.

Implementation of the research results. Based on the results of the study of the influence of neutron radiation on thermal and electrophysical properties of structural materials of the nuclear reactor:

the detected 20% reduction of thermal conductivity upon irradiation of SAV-1 alloy with fast neutrons was used to determine the maximum permissible temperature of a fuel element and the maximum burnup of U-235 at the research nuclear reactor WW-SM INP AS RUz (Letter of AS RUz No. 2 / 1255-361 dated 04.02 .2020). Application of the results allowed extending the life of nuclear fuel up to 65% burn up of uranium-235;

the results of determining the Debye temperature for construction alloys SAV-1 and AMG-2 and the dependence of thermal conductivity and the Wiedemann-Franz coefficient of construction alloy SAV-1 on neutron fluence were used in the framework of the applied research project FA-Atech-2018- (175 + 170) "Development of methods for optimizing fuel cycles and controlling parameters of WWR-SM nuclear reactor " INP AS RUz (2018-2020). The use of the results made it possible to determine fast neutrons flux density in the WWR-SM research reactor channels;

the revealed nonlinear nature of the growth of electrical resistance in the neutron-irradiated construction alloy SAV-1 in the temperature range from 290 to 500 K was used at the Hanoro reactor of the Republic of Korea (Letter from the Korean Atomic Energy Research Institute of 08/02/2019). The use of the results made it possible to determine fast neutrons fluence in the irradiated samples.

Approbation of work. The main results of the dissertation were presented and discussed at 3 international and 4 republican scientific conferences.

Publication of research results. On the topic of the dissertation, 14 scientific papers were published, including 4 articles in journals recommended by the Higher Attestation Commission of the Republic of Uzbekistan, 2 of them in the international journals issued abroad.

The structure and volume of the dissertation. The dissertation consists of an introduction, four chapters, conclusion, list of references and appendix. The dissertation length is 99 pages.

ЭЪЛОН ҚИЛИНГАН ИШЛАР РЎЙҲАТИ
СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ
LIST OF PUBLISHED WORKS

I бўлим (I часть; part I)

1. Абдукадырова И.Х., Аликулов Ш.А. Особенности процесса изменения теплопроводности обработанных в ядерном реакторе малыми дозами алюминиевых сплавов типа САВ-1 // Альтернативная энергетика и экология. – Саров (Россия), 2012. – №1(105). – С. 21–25. (№3.Scopus; IF=0.807)
2. Салихбаев У.С., Аликулов Ш.А., Ахмеджанов Ф.Р., Байтелесов С.А., Кунгуров Ф.Р., Болтабоев Ф.Р. Влияние нейтронного облучения на теплопроводность алюминиевого сплава САВ-1 // Узбекский физический журнал. – Ташкент, 2013. – Т. 15, №3-4. – С. 197-203. (01.00.00. №5)
3. Alikulov Sh. A., Akhmedzhanov F. R., Baytelesov S. A., Boltabaev A. F., Kungurov F. R., Rakhimov E. T., Salikhbaev U. S. High-Temperature Electric and Thermal Conductivity of the Aluminum Alloys SAV-1 and AMG-2 // Atomic Energy. – Moscow, 2015. –Vol. 117, No 5. – pp. 334-339. (№ 3. Scopus; IF=0.384)
4. Аликулов Ш.А., Ахмеджанов Ф.Р., Байтелесов С.А., Болтабоев Ф.Р., Рахимов Э.Т., Салихбаев У.С. Действие нейтронного излучения на структуру и электропроводность алюминиевого сплава САВ-1 // Узбекский физический журнал. – Ташкент, 2015. – Т. 17, №4. – С. 248-253. (01.00.00. №5)

II бўлим (II часть; part I)

5. Байтелесов С.А., Кунгуров Ф.Р., Рахимов Э.Т., Таджибаев Д.П., Аликулов Ш.А. Влияние реакторного излучения на теплопроводность конструкционного материала реактора САВ-1 // «Замонавий физиканинг долзарб муаммолари»: Республика ёш олимлар ва иқтидорли талабалар мактаб – семинари материаллари. – Самарқанд, 2010. – С. 76-78.
6. Салихбаев У.С., Абдукадырова И.Х, Байтелесов С.А., Аликулов Ш.А.. К вопросу о радиационном эффекте теплофизических свойствах конструкционных сплавов // «Фундаментальные и прикладные вопросы физики»: Международная конференция, посвященная 80-летию академика М.С. Саидова. – Ташкент, 2010. – С. 370-372.
7. Абдукадырова И. Х., Байтелесов С. А., Аликулов Ш. А. О температурной зависимости теплофизических свойств конструкционных алюминиевых сплавов // «Ядерная и радиационная физика»: 8–я международная конференция. – Алматы, 2011. – С. 80.
8. Абдукадырова И.Х., Аликулов Ш.А. Влияние нейтронного излучения на теплофизические параметры некоторых конструкционных материалов // «Актуальные вопросы мирного использования атомной энергии»:

Международная конференция молодых ученых и специалистов. – Алматы, 2012. – С.14-15.
9. Abdukadyrova I.Kh., Alikulov Sh., Haydarov T., Boltaboev A.F. Effects of radiation on thermal and mechanical parameters of some construction materials // “Nuclear Science and its Application” International Conference, Samarkand, 25-28 September, 2012. – Tashkent, 2012. - P. 285-286.
10. Аликулов Ш.А. Влияние нейтронного облучения на теплопроводность алюминиевого сплава САВ-1 // «Физика и экология»: Республиканская научно - практическая конференция. – Нукус, 2013. – С. 15.
11. Salikhbaev U.S., Ф.Р. Ахмеджонова., Akhmedzhanov F.R., Alikulov Sh.A., Baytelesov S.A., Rakhimov E. T. Kinetics of Radiation Damages in SAV-1 Alloy under Neutron Irradiation // 3rd European Nuclear Physics Conference (EuNPC 2015), 31 August – 4 September 2015. – Groningen (Netherlands), 2015. - p. 76
12. Akhmedzhanov F.R., Alikulov Sh.A., Baytelesov S.A., Boltabaev A.F., Kungurov F.R., Salikhbaev U.S. Radiation damages in SAV-1 alloy under neutron irradiation // “New Trends of Development Fundamental and Applied Physics: Problems, Achievements and Prospects”: Book of abstracts of International Symposium. – Tashkent, 2016. – pp. 244-245.
13. Аликулов Ш.А., Ахмеджанов Ф.Р., Байтелесов С.А., Болтабаев А.Ф, Кунгуров Ф.Р., Абдуманапов У.Ж, Бекбаев С.М. Влияние нейтронного излучения на электропроводность сплава САВ-1 // «Актуальные проблемы и тенденции инноваций в современной науке и образовании»: Материалы Международной научно – практической конференции.– Туркестан, 2017. – С. 479–481.
14. Аликулов Ш.А., Байтелесов С.А., Кунгуров Ф.Р. Зависимость удельного сопротивления сплава САВ-1 от флюенса быстрых нейтронов и от температуры // V Республиканская конференция молодых физиков Узбекистана “Ядерная физика и ядерные технологии”. – Ташкент, 2018. – С. 88-91.