

ӨОЖ 665.775; <https://doi.org/10.37878/2708-0080/2023-4.09>

<https://orcid.org/0000-0002-9847-8218>

<https://orcid.org/0000-0001-8228-7188>

<https://orcid.org/0000-0001-8030-8934>

<https://orcid.org/0000-0001-8273-0020>

<https://orcid.org/0000-0003-2732-3507>

<https://orcid.org/0000-0003-4074-5499>

<https://orcid.org/0000-0002-7590-2450>

МҰНАЙ БИТУМДАРЫН РЕЗЕҢКЕТЕХНИКАЛЫҚ ҚАЛДЫҚТАРЫМЕН МОДИФИКАЦИЯЛАУ



А.Ш. АККЕНЖЕЕВА¹,
техника ғылымдарының
кандидаты,
«Жаратылыстану ғылымдары»
кафедрасының доценті,
anar.akkenzheyeva@yu.edu.kz



А.Ч. БУСУРМАНОВА¹,
химия ғылымдарының
кандидаты,
«Жаратылыстану ғылымдары»
кафедрасының доценті,
akkenzhe.bussurmanova@yu.edu.kz



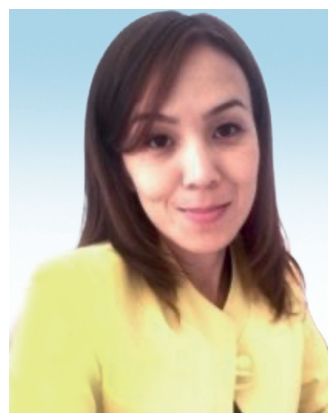
А.К. СЕРИКБАЕВА¹,
техника ғылымдарының
кандидаты, «Экология және
геология» кафедрасының
профессоры,
akmaral.serikbayeva@yu.edu.kz



Е.И. ИМАНБАЕВ²,
PhD, қауымдастырылған
профессор, мұнай-химиялық
процестер зертханасының аға
ғылыми қызметкері,
erzhan.imanbayev@mail.ru



М.М. ИБРАЕВА¹,
PhD, «Жаратылыстану
ғылымдары»
кафедрасының доценті,
manshuk.ibrayeva@yu.edu.kz



А.Н. БОРАНБАЕВА¹,
магистр, «Жаратылыстану
ғылымдары» кафедрасының
аға оқытушысы,
assiya.boranbayeva@yu.edu.kz

С.У. СЫДЫКОВ³, магистр, «CASPI BITUM «БК» ЖШС Ақтау битум зауытында ЭЛОУ-АВТ битумды тотықтыру және модификациялау цехының бастығы, S.Sydykov82@mail.ru

¹Ш.ЕСЕНОВ АТЫНДАҒЫ «КАСПИЙ ТЕХНОЛОГИЯЛАР
ЖӘНЕ ИНЖИНИРИНГ УНИВЕРСИТЕТІ» КЕАҚ
Қазақстан Республикасы, 130000, Ақтау қаласы, 32 шағынаудан

²РМК «ЖАНУ ПРОБЛЕМАЛАРЫ ИНСТИТУТЫ»
Қазақстан Республикасы, 050012, Алматы қаласы, Бөгенбай батыр көшесі, 172

³«CASPI BITUM» БК »ЖШС
Қазақстан Республикасы, 130000, Ақтау, 5 индустриалды аймақ, 65 ғимарат

Бұл мақалада резеңке қалдықтарымен мұнай битумының модификациясына шолу жасалды, резеңкеленген асфальтты байланыстырғыштарды алудың әртүрлі технологиялары қарастырылады: құрғақ процесс, жоғары тұтқырлығы бар ылғалды процесс және араластырусыз ылғалды процесс, олардың артықшылықтары мен кемшіліктері көрсетілген. Ылғалды процесс асфальтты байланыстырғышты жоғары температурада үгінді резеңкемен алдын ала араластыру арқылы тікелей өзгертеді, нәтижесінде жоғары температурада икемділігі мен тұтқырлығы жоғары ең тұрақты материал алынады. Резеңке үгіндісін девулканизациялаудың термиялық, механикалық, термомеханикалық, химиялық, механикохимиялық, микротолқынды пеш сияқты әртүрлі нұсқалары қарастырылады. Сондай-ақ резеңке үгіндісін девулканизациялаудың әртүрлі нұсқаларының артықшылықтары мен кемшіліктері қарастырылады. Әдебиеттерді шолу деректері композиттік байланыстырғыштың модификаторы ретінде үгінді резеңкесін пайдалану оның айтарлықтай ерекшеленуі мүмкін физика-химиялық қасиеттері мен құрылымын міндетті түрде ескеруді талап ететінін көрсетті. Қазіргі уақытта резеңке үгіндісін өндіру технологиясына қарамастан, шина қалдықтары бастапқы резеңкенің химиялық құрамы мен құрылымдық ерекшеліктері ескерілмей, тек диаметрі бойынша сұрыпталады, өйткені гранулометриялық құрамы мен шнур қоспаларының сандық көрсеткіші ағымдағы нормаланған дайын өнім сапасының көрсеткіштері. Сондықтан алынған өнімнің соңғы қасиеттері әртүрлі. Бірдей технология бойынша өндірілген резеңке үгіндісі шиналарды өндіруге арналған шикізаттың қасиеттерінің айырмашылығына байланысты айтарлықтай бастапқы айырмашылықтарға ие. Құрылымдық резеңке үгіндісінің дәрежесіне және инертті толтырғыштың мөлшеріне байланысты резеңке-битум байланыстырғыштарын өндіру технологиясын жеке таңдау қажет.

ТҮЙІН СӨЗДЕР: битум, модификация, резеңке үгіндісі, резеңке-битум-байланыстырушы, девулканизация.

МОДИФИКАЦИЯ НЕФТЯНЫХ БИТУМОВ РЕЗИНОТЕХНИЧЕСКИМИ ОТХОДАМИ

А.Ш. АККЕНЖЕЕВА¹, кандидат технических наук, доцент кафедры «Естественные науки», anar.akkenzheyeva@yu.edu.kz

А.Ч. БУСУРМАНОВА¹, кандидат химических наук, доцент кафедры «Естественные науки», akkenzhe.bussurmanova@yu.edu.kz

А.К. СЕРИКБАЕВА¹, кандидат технических наук, профессор кафедры «Экология и геология», aktmaral.serikbayeva@yu.edu.kz

Е.И. ИМАНБАЕВ², PhD, ассоциированный профессор, старший научный сотрудник лабораторий нефтехимических процессов РГП «Институт проблем горения», erzhan.imanbayev@mail.ru

М.М. ИБРАЕВА¹, PhD, доцент кафедры «Естественные науки», manshuk.ibrayeva@yu.edu.kz

А.Н. БОРАНБАЕВА¹, магистр, старший преподаватель кафедры «Естественные науки», assiya.boranbayeva@yu.edu.kz

С.У. СЫДЫКОВ³, магистр, начальник цеха ЭЛОУ-АВТ, окисления и модифицирования битумов ТОО «СП «CASPI BITUM» Актауского битумного завода, S.Sydykov82@mail.ru

¹НАО «КАСПИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ТЕХНОЛОГИИ И ИНЖИНИРИНГА
ИМ. Ш. ЕСЕНОВА»,
Республика Казахстан, 130000, г. Актау, 32 мкр

²РГП «ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ ГОРЕНИЯ»,
Республика Казахстан, 050012, г. Алматы, ул. Богенбай батыра, 172

³ТОО «СП CASPI BITUM»,
Республика Казахстан, 130000, г. Актау, Промзона 5, зд. 65

В данной статье представлен обзор по модификации нефтяных битумов резинотехническими отходами, рассмотрены различные технологии производства прорезиненных асфальтовых вяжущих: сухой процесс, мокрый процесс с высокой вязкостью и мокрый процесс без перемешивания, показаны их преимущества и недостатки. Мокрый процесс модифицирует асфальтовое вяжущее непосредственно путем предварительного смешивания с резиновой крошкой при повышенных температурах, он приводит к тому, что материал получается наиболее стабильный, с увеличенными показателями эластичности, вязкости при высоких температурах. Рассмотрены различные варианты девулканизации резиновой крошки, такие как термические, механические, термомеханические, химические, механохимические, микроволновые. Также рассмотрены преимущества и недостатки различных вариантов девулканизации резиновой крошки. Данные литературного обзора выявили, что применение резиновой крошки в качестве модификатора композиционного вяжущего требует обязательного учета ее физико-химических свойств и структуры, которые могут значительно отличаться. На данный момент, вне зависимости от технологии производства резиновой крошки, сортировка отработанных шин производится только по их диаметру без учета химического состава и особенностей структуры исходных каучуков, так как действующими нормируемыми показателями качества готового продукта являются гранулометрический состав и количественный показатель примесей корда. Именно поэтому конечные свойства получаемого продукта отличаются. Резиновая крошка, произведенная по одной технологии имеет существенные начальные отличия вследствие различий в свойствах сырья для производства шин. В зависимости от степени структурированности резиновой крошки и количестве инертного наполнителя необходим индивидуальный подбор технологии производства резинобитумных вяжущих.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: битум, модификация, резиновая крошка, резино-битумно-вяжущее, девулканизация.

MODIFICATION OF PETROLEUM BITUMENS WITH RUBBER WASTE

A.Sh. AKKENZHEYEVA¹, candidate of technical sciences, associate professor of the department of «Natural Sciences», anar.akkenzheyeva@yu.edu.kz

A.Ch. BUSSURMANOVA¹, candidate of chemical sciences, associate professor of the department of «Natural Sciences», akkenzhe.bussurmanova@yu.edu.kz

A.K. SERIKBAYEVA¹, candidate of technical sciences, professor of the Department of «Ecology and Geology», akmaral.serikbayeva@yu.edu.kz

Y.I. IMANBAYEV², PhD, associate professor, senior researcher of the laboratories of petrochemical processes of the RSE «Institute of Combustion Problems», erzhan.imanbayev@mail.ru

M.M. IBRAYEVA¹, PhD, associate professor of the department of «Natural Sciences»,
manshuk.ibrayeva@yu.edu.kz

A.N. BORANBAYEVA¹, master, senior lecturer of the department of «Natural Sciences»,
assiya.boranbayeva@yu.edu.kz

S.U. SYDYKOV³, master, Head of the shop CDU-AVT, oxidation and modification of bitumen LLP
«JV» CASPI BITUM» Aktau bitumen plant, *S.Sydykov82@mail.ru*

¹ NCJSC "CASPIAN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY AND ENGINEERING"
NAMED AFTER SH. ESENOVA",
Republic of Kazakhstan, 130000, Aktau, 32 microdistrict

²RSE "INSTITUTE OF COMBUSTION PROBLEMS",
Republic of Kazakhstan, 050012, Almaty, 172 Bogenbay batyr str.

³"CASPI BITUM JV" LLP,
Republic of Kazakhstan, 130000, Aktau, 5 Industrial zone, building. 65

This article provides an overview of the modification of petroleum bitumen with rubber waste, considers various technologies for the production of rubberized asphalt binders: dry process, wet process with high viscosity and wet process without mixing, shows their advantages and disadvantages. The wet process modifies the asphalt binder directly by premixing it with crumb rubber at elevated temperatures, resulting in the most stable material with increased elasticity and viscosity at high temperatures. Various options for the devulcanization of crumb rubber, such as thermal, mechanical, thermomechanical, chemical, mechanochemical, microwave, are considered. The advantages and disadvantages of various options for devulcanization of crumb rubber are also considered. The data of the literature review revealed that the use of crumb rubber as a modifier of a composite binder requires mandatory consideration of its physicochemical properties and structure, which can differ significantly. At the moment, regardless of the rubber crumb production technology, waste tires are sorted only by their diameter, without taking into account the chemical composition and structural features of the original rubber, since the granulometric composition and quantitative indicator of cord impurities are the current normalized indicators of the quality of the finished product. That is why the final properties of the resulting product are different. Rubber crumb produced by the same technology has significant initial differences due to differences in the properties of raw materials for the production of tires. Depending on the degree of structured rubber crumb and the amount of inert filler, an individual selection of the technology for the production of rubber-bitumen binders is necessary.

KEY WORDS: bitumen, modification, rubber crumb, rubber-bitumen-binder, devulcanization.

Қіріспе. Қазіргі уақытта тозған резеңке қалдықтарды жағу немесе жыраларға, коқыс тастайтын жерлерге көму арқылы толығымен жойылады және бұл қоршаған ортаны қатты ластайды. Мысалы, Ресейде пайдаланылған шиналардың 96% коқыс тастайтын жерлерге шығарылады. Қазақстанда тозған шиналарды қайта өңдеу көлемі шамамен 13-15% құрайды. Тозған шиналарды қайта өңдеу бойынша ҚР нақты жұмыс істеп тұрған кәсіпорындарының жылдық жиынтық өндірістік қуаты шамамен 60,000 тоннаны құрайды. Көріп отырғанымыздай, резеңке қалдықтарын қайта өңдеп кәдеге жарату мәселесін шешудің экологиялық маңызы зор.

Жол төсемдерін салу үшін байланыстырғыш зат ретінде қолдануға арналған ең әмбебап материал – мұнай битумы болып табылады. Бұл оның төмен температура-ның, температураның өзгеруінің және әртүрлі деформациялық жүктемелердің әсерін бұзбай төтеп беру қабілетінің арқасында жүзеге асырылады.

Қазақстанда жалпы қуаттылығы жылына 1,2 млн тонна болатын жол битумын өндіретін 4 зауыт жұмыс істейді. Отандық өндіріс республиканың жол саласының қажеттілігін толық қамтамасыз етеді. 2016 жылы «CASPI BITUM «БК» ЖШС кәсіпорнында битум өндірісі іске қосылды. Қазіргі уақытта «CASPI BITUM «БК» ЖШС жылына 120000 тонна модификацияланған битум өндіреді.

Соңғы уақытта мұнай битумын әртүрлі полимерлі материалдармен, соның ішінде үгінді резеңкемен модификациялау технологиялары кеңінен тарады.

Полимерлі битумды байланыстырғыштар (ПББ) өндірісіндегі негізгі мәселе битум шикізаты мен қымбат полимерлердің сапасының тұрақсыздығы болып табылады деп есептеледі. Бүгінгі таңда біз мұнай өңдеу зауыттарының көрсеткіштердің мәндерінің тар диапазонында қажетті сапалық сипаттамалардағы битум өндірісін қамтамасыз ете алмайтындығымен бетпе-бет келіп отырмыз.

Битумдарды модификациялау үшін қолданылатын полимерлердің көпшілігі химия өнеркәсібінің өнімдерін ұсынатындықтан, бұл байланыстырғыш заттардың құнының өсуіне әсер етеді. Резеңке үгінділері резеңке-техникалық қалдықтарын механикалық қайта өңдеудің өнімі болып табылады. Мысалы, Еуропада жыл сайын шамамен 2 миллион тонна, ал АҚШ-та 2,8 миллион тонна тозған шиналар пайда болады. ҚР-да тозған шиналардың жыл сайынғы түзілу көлемі 100000 тоннаны құрайды.

Қазіргі уақытта модификациялық қоспалар ретінде әртүрлі материалдар қолданылады, олардың арасында полимерлі компоненттер, өндірістен шыққан қалдықтар әсіресе кеңінен қолданылады. Мұнай байланыстырғыштарын модификациялау үшін стирол-бутадиен стирол блок-сополимерлер (СБС) немесе олардың аналогтары ең көп қолданылды. Олардың сапасын жақсарту және битум негізіндегі композиттік байланыстырғыштарды жасау үшін кеңінен қолдану өндірістің үлкен көлемімен және қолжетімділігімен байланысты. Алайда, СБС және олардың аналогтарын полимерлік модификациялық қоспалар ретінде пайдалану кезінде полимерлі-битумды байланыстырғыш заттардың құнының айтарлықтай өсуі мәселесі туындайды [1], бұл оларды жол құрылысында кеңінен қолдануға мүмкіндік бермейді.

Битумды байланыстырғыштың эксплуатациялық қасиеттерін реттеуді оған тозған автомобиль шиналарын қайта өңдеп алынған резеңке үгіндісі негізіндегі модификаторды енгізу арқылы жүргізу, қазіргі уақытта битум модификациясының ең перспективалы және сәтті дамып келе жатқан бағыты болып табылады.

Резеңке қосылған жолдарды салу кезінде шығындарды үнемдеу ұзақ уақытқа созылатын автомобиль жабынының қалыңдығының төмендеуіне байланысты 40 % жетуі мүмкін. Резеңкеленген асфальттың қасиеттерін зерттеу модификатор ретінде үгінді резеңкенің жоғары әлеуетін көрсетеді.

Қазақстан Республикасында тозған шиналардың пайда болуының жыл сайынғы көлемі: 100,000 тонна болғандықтан, қазіргі уақытта резеңке қалдықтарын қайта өңдеу және мұнай битумдарын байланыстыратын заттардың сапасын арттыру мәселесін шешуде битумды үгінділермен модификациялау бағыты перспективалы болып табылады [2-3].

Қазіргі уақытта резеңкеленген асфальтты байланыстырғыштарды өндірудің үш түрлі технологиясы бар, олар түбегейлі әртүрлі нәтиже береді, атап айтқанда

құрғақ процесс, жоғары тұтқырлығы бар ылғалды процесс және араластырусыз ылғалды процесс [4]. Үшеуі де асфальт қоспаларында қайта өңделген шина резеңкесін пайдаланғанымен, олардағы резеңкенің рөлі әртүрлі, сондықтан әр әдісті бөлек қарастыру керек [5]. Прести және басқалардың [6] мәліметтері бойынша, ұсақталған шина резеңкесін асфальт қоспаларына қосу алғаш рет 1960 жылдары жүзеге асырылған. Содан бері резеңке үгінділерді асфальтқа қосу процесі екі түрлі тәсілмен қолданылды. Құрғақ процесс қоспаға асфальт байланыстырғышты енгізер алдында резеңке үгінділерді қыздырылған толтырғыштармен араластыруды қамтиды. Ылғалды процесс асфальтты байланыстырғышты шамамен 177-210°C жоғары температурада резеңке үгіндісімен алдын ала араластыру арқылы тікелей өзгертеді [6]. Резеңке үгінділерін екі әдіспен қолданылуының арасындағы түбегейлі айырмашылығы – ол құрғақ процесте толтырғыштарды ауыстырады, ал ылғалды процесте модификатор ретінде қызмет етеді. Құрғақ процесте толтырғыш түріндегі резеңке үгіндісінің бөлшектері әдетте ылғалды процесте қолданылатындардан үлкенірек болады. Араластыру кезінде ұсақталған шина резеңкесі байланыстырғышта жартылай ғана ериді және құрылыммен толық бірікпейді [7]. Осыған байланысты резеңке үгіндісінің қасиеттері толық пайдаланылмайды, ал құрғақ процестегі қоспаның консистенциясы мен қасиеттерін бақылау қиын [6]. Дегенмен, құрғақ процесс әлі де өндірудің қарапайымдылығына байланысты шиналардың үлкен мөлшерін тұтынудың өміршең тәсілі болып табылады [8].

Екінші жағынан, жоғары тұтқырлығы бар ылғалды процесс резеңке үгіндісін асфальт байланыстырғыштың өзіне толығымен енгізді. Бұл процесті модификацияланған асфальт байланыстырғыштарды да, бүріккіш байланыстырғыштарды да өндіру үшін қолайлы етеді [8]. Бұл процесте асфальтты резеңке жұқа бөлінген шина резеңкелері мен кәдімгі асфальт байланыстырғыштар арасындағы реакция арқылы өндіріледі. Бұл процесс жол асфальт жабындарын өндіруде ұсақ және ірі толтырғыштарға қосқанда байланыстырғыштың байланыстыру қасиеттерін жақсартады [9]. Резеңке үгіндісі мен асфальтты байланыстырғышты алдын ала араластыру асфальт зауытында немесе тасымалданатын араластырғыш қондырғыларды пайдалана отырып орындалады. Алдын ала араластыру кезінде ұсақталған шина резеңке асфальт байланыстырғышқа үш түрлі сатымен беріледі. Резеңке бөлшектер бастапқыда жоғары температурада асфальт байланыстырғыштың бір бөлігін сіңіріп, олардың ісінуіне әкеледі. Асфальтты байланыстырғыштың сіңуін жалғастыру және араластыру қыздыру мен араластырудан кейін резеңке үгіндісінің бөлшектерін гельге айналдырады, бұл қоспаның жалпы тұтқырлығын арттырады [8]. Тұрақты қыздыру және араластыру кезінде резеңке үгіндісінің бөлшектері ыдырау салдарынан жойылып, асфальтты байланыстырғышқа өтетін мұнайға айналады [6].

Ұсақталған шина резеңке мен асфальт байланыстырғыштың өзара әрекеттесу механизмі бір мезгілде екі процестен тұрады. Резеңкенің битумға жартылай ыдырауы және резеңке полимер тізбектері арқылы ароматты майлардың адсорбциясы жүреді [6]. Резеңке үгіндісінің бөлшектерінің гельденуі және жұмсаруы битумдағы ароматты майлардың резеңке полимер тізбектеріне сіңуінен туындайды деп есептеледі [6]. Резеңкеленген асфальттың қасиеттерін жақсартатын дәл осы өзара әрекеттесу екенін растау үшін қосымша зерттеулер қажет. Ылғалды процесте ұсақталған шина

резеңкесі толтырғыштармен араласпас бұрын асфальт байланыстырғышпен әрекеттесе де, соңғы өнімнің тұтқырлығы шамамен 2 сағаттан кейін төмендей бастайтыны көрсетілген. Тұтқырлықтың төмендеуі асфальтты байланыстырғыштағы резеңке үгіндісінің толық ыдырауынан және үйлесімділік мәселелерімен байланысты деп саналады. Нәтижесінде тұтқырлығы жоғары ылғалды процесс арқылы жасалған модификацияланған асфальт байланыстырғыш фазалардың бөлінуін болдырмау және қажетті қасиеттерді сақтау үшін тасымалдау және сақтау кезінде үнемі араластырылуы керек. Сыртқы араластырусыз сақтау кезінде оның қасиеттерін сақтай алмау, араластырусыз жоғары тұтқырлық процесінің негізгі кемшілігі болып саналады.

Тұтқырлығы жоғары ылғалды процеспен байланысты сақтау мәселелерін жеңу үшін уақыт өте келе қабаттаспайтын өнім шығару үшін өндіріс әдісін өзгертуге болады. Араластырмайтын ылғал процесс – асфальтты байланыстырғышқа қатты бөлшектерді шина резеңкесінің толық ыдырауын қамтамасыз ету үшін жоғары қысымды, араластыру температурасын және ығысу күштерін пайдаланатын жоғары тұтқырлығы бар ылғалды процестің жетілдірілген нұсқасы [10]. Бұл процесте араластыру жағдайында резеңке үгіндісінің бөлшектерінің ыдырауы және девулканизациясы арқылы толық ыдырауға қол жеткізіледі. Ылғалды, араластырусыз процесс жоғары тұтқырлық процесіне қарағанда біркелкі және айтарлықтай тегіс болатын модификацияланған байланыстырғышты шығарады. Бұған қоса, резеңке үгіндісінің бөлшектерінің сыну жақсаруы байланыстырғышты сақтаудың жақсы қасиеттеріне әкеледі, және тасымалдау және сақтау кезінде араластыру қажет емес [10]. Бұл процесс тұтқырлығы жоғары ылғал процеске қарағанда жақсы қауіпсіздікті қамтамасыз еткенімен, кейбір механикалық қасиеттері, мысалы, жолтабан түзілуге төзімділігі мен шаршауға төзімділігі жойылады [8]. Өнімділіктің мұндай төмендеуі резеңке байланыстырушы затқа сіңген кезде оның серпімділік қасиетінің толық жоғалуымен байланысты [6].

Зерттеу материалдары мен әдістері. Ылғалды процесте араластырусыз байланыстырғыш модификатор толтырғыштарға жағу алдында битуммен араластырылады. Резеңкемен модификацияланған асфальт қоспаларының негізгі артықшылығы байланыстырғыштың өнімділік қасиеттерін жақсарту болып табылады. Оларға жолдар мен тротуарлардың тұтқырлығын, серпімділігін және пластикасын арттыру кіреді. Асфальт байланыстырғышпен модификацияланған кезде ұнтақталған резеңке стирол-бутадиен стирол (СБС) сияқты жиі қолданылатын таза полимер модификаторларының басқа түрлері сияқты өнімділік артықшылықтарын қамтамасыз етеді. Тұтқырлығы жоғары ылғалды процесс кезінде қол жеткізілген тұтқырлықтың ұлғаюына байланысты толтырғыштың айналасындағы байланыстырғыштың орташа қалыңдығы өсті. Бұл оны толтырғышпен толтыру үшін толтырғыштар арасында жеткілікті бос орындар бар ашық қоспалар үшін қолданылатын резеңкеленген асфальтты байланыстырғыштарды өндіру үшін қолайлы етеді [8]. Тығыз қоспалары бар қолданбалар үшін араластырғыштың жақсырақ ағуын және бүкіл қоспаға таралуын қамтамасыз ету үшін араластырусыз дымқыл процесс қолайлы [8].

Нәтижелер және талқылау. Ылғалды процесті 1960 жылдары Макдональд әзірлеген және жалпы принциптер жылдар бойы өзгеріссіз қалды. Бұл процесте резеңкеленген битум араластырғыш ыдыста резеңке үгіндісі мен битумды алдын ала

араластыру арқылы өндіріледі [11]. Содан кейін бұл өзгертілген байланыстырғыш қоспаны айналдыру және біркелкі тарату үшін шнектермен жабдықталған сақтау резервуарына жіберіледі. Реакция үшін 45-60 минут ұстауға рұқсат етіледі. Содан кейін модификацияланған битум асфальтбетон толтырғыштарымен модификацияланбаған битум сияқты араласады [6].

Жоғарыда аталған екі әдіске сәйкес Ресейде «БИТРЕК» битум-резеңкелі экологиялық таза композициялық материалды, «УНИРЕМ» модификаторын, «БРК – ИГУ», резеңке-битумды байланыстырғыштарын алды [12]. Бұл резеңке-битумды байланыстырғыштар автомобиль жолдарында сыналды [13].

«БИТРЕК» өндірісіндегі басты айырмашылық компания дайын өнімді негізгі құрамдас бөліктерді, атап айтқанда резеңке үгіндісін көрсетпей жеткізеді. Автомобиль доңғалақтары пайдалану жағдайларына және автомобильдердің доңғалақтарындағы әртүрлі жүктемелерге байланысты әртүрлі химиялық құрамға ие болатыны белгілі. Сондықтан бір технологиялық процесс резеңке-битум байланыстырғышты алудың бірдей технологиялық режимімен сипатталмайды. «КМА» күрделі асфальтбетонды модификаторы – минералды бөліктің салмағы бойынша 0,3-тен 3,0%-ға дейінгі мөлшерде асфальтбетон қоспасына тікелей енгізуге арналған ұнтақ болып табылатын материал. «Унирем» – жоғары температурада ығысумен ұнтақтау арқылы өндірілетін девулканизацияланған каучуктың белсендірілген резеңке ұнтағы [14].

Профессор В.Г. Никольский және басқалары [15] «Унирем» асфальтбетон модификаторын зерттеу нәтижелерін ұсынды. Басқа модификаторлардан айырмашылығы, «Унирем» байланыстырғышқа, яғни резеңке үгіндісімен модификацияланған битум алу үшін («ылғал» әдіс) және оны дайындау сатысында тікелей ыстық асфальтбетон қоспасына («құрғақ» әдіс) қосылуы мүмкін. Битумға немесе дайын асфальтбетон қоспасына (байланыстырғыштың салмағы бойынша 10%-ға дейін) енген кезде резеңке үгіндісінің бөлшектері ыдырайды, ал байланыстырғыштың қасиеттері өзгереді, адгезиясы 5 есеге дейін артады [15].

«БИТРЕК» битум-резеңке экологиялық композиттік байланыстырғыштары фазасы бойынша гетерогенді (гетерогенділігі 0-ден 3 мм-ге дейін) және химиялық құрамы бойынша бір-бірімен химиялық байланысқан битум мен резеңке үгіндісінен тұрады. Деректер бірнеше жыл жұмыс істегеннен кейін резеңке-битумды байланыстырғыш негізіндегі тәжірибелік участкелердің жай-күйі әдеттегі битуммен де, СБС негізіндегі модификацияланған битуммен де жасалған көрші участкелермен салыстырғанда айтарлықтай жақсырақ болғанын көрсетеді [16].

Резеңке-битум байланыстырғышты алудың «ылғал процесі» материалдың икемділігі жоғарылаған, жоғары температурада тұтқырлығы бар ең тұрақты болуына әкеледі, бұл төсеу қоспаларындағы пленкалардың қалыңдығын арттыруға мүмкіндік береді. Осы технология бойынша байланыстырғыштарды 160-220°C температурада өндіру ұсынылады. Битумды алу реакциясының өзі бір мезгілде екі процестен тұрады: бір жағынан резеңкеден битумға ішінара сіңіру және екінші жағынан резеңке үгіндісінде кездесетін табиғи және синтетикалық резеңкенің негізгі компоненттері болып табылатын полимер тізбектеріндегі ароматты майлардың адсорбциясы. Битумдағы ароматты майларды резеңке полимер тізбектерімен сіңіру резеңкенің ісініп, жұмсаруын тудырады [17]. Резеңке бөлшектері битумның майлы

фазасын жоғары температурада (160-220°C) полимерлі тізбектермен сіңіру есебінен ісінеді, олар гель тәрізді материал түзетін резеңке үгіндісінің негізгі компоненттері болып табылады. Сондықтан реакция кезінде бір мезгілде майлы фракцияның азаюы және резеңке бөлшектердің өлшемдерінің ұлғаюы, содан кейін бөлшектер арасындағы қашықтықтың азаюы байқалады. Бұл тұтқырлықты 10 есеге дейін арттыратын гельдік құрылымдардың пайда болуын білдіреді.

Беларусь ғалымдары жолдардың тәжірибелік учаскелерінде СБС және резеңке негізіндегі модификаторларды қолдану тиімділігін салыстырды, жоғары температурада ПББ беріктік, жолтабанға тұрақтылық, шаршау беріктігі және жабында пайда болатын ақаулар саны бойынша резеңке үгіндісі бар модификаторға жол беретіні анықтады. «РОСДОРНИИ» ФАМ зерттеуі резеңке үгіндісін пайдаланған кезде битумын PG сипаттамаларының жоғарғы шегін жақсартуы, ал төменгі шегін нашарлатуының жоғары ықтималдылыққа мүмкін екенін көрсетті. АҚШ-тың резеңкеленген асфальт қорының төрағасы және директоры Джордж Уэй мен Джордж Соуза, -30 °C және одан төмен температуралар үшін резеңке модификаторы бар композицияны таңдау өте қиын деп келісті. Қордың шиналарды қолдану бойынша табысты тәжірибесі негізінен АҚШ, Бразилия, Индонезияның оңтүстік Штаттары сияқты ыстық климаты бар жерлерге қатысты [18].

Резеңке-битумды байланыстырғыштарды дайындау кезінде резеңке үгінділерін девулканизациялау сапалы модификациялағыш агент алу кезінде маңызды кезең болып табылады. Девулканизация қолданылған шиналардағы каучукты бастапқы шикізатқа қалпына келтіреді, бұл тігілген күкіртті байланыстарды ыдырату, полимер байланыстарын сақтау арқылы қол жеткізіледі [19]. Қазіргі уақытта девулканизация үшін термиялық, механикалық, термомеханикалық, химиялық, механикохимиялық, биологиялық, микротолқынды, ультрадыбыстық және осы әдістердің кез келген комбинациясы, мысалы, термохимиялық, термосоникалық сияқты бірнеше әртүрлі әдістер қолданылады [19]. Девулканизацияның тиімділігі Соклет экстракциясы арқылы органикалық еріткіштің аз көлеміндегі еритін каучуктың мөлшерімен бағаланады. Оны көлденең байланыс тығыздығының пайыздық төмендеуі ретінде де анықтауға болады [20].

Резеңке шиналарының үгінділерін термиялық девулканизациялау кезінде көміртектің қос және жалғыз байланыстарын, көміртегі мен күкірттің біртұтас байланыстарын және күкірттің жалғыз байланыстарын үзу қажет. Көміртегі қос байланысын үзу өте жоғары энергияны (614 кДж/моль) қажет етеді, дегенмен S-S (227 кДж/моль) және C-S (273 кДж/моль) байланыстарды үзу энергиясы олардың үзілу энергияларына ұқсас. C-C байланысы (348 кДж/моль) [21-22]. Сондықтан, бұл процестер әдетте күкірт пен полимер арасындағы тігілген байланыстардың кездейсоқ үзілуіне әкеледі. Термиялық девулканизация жоғары термиялық тұрақтылыққа және қыздыруға байланысты қаттылықтың жоғарылауына байланысты да проблемалы болып табылады [23]. Резеңке үгіндісі бұмен (180-ден 260 °C дейін) термиялық девулканизация кезінде жарты күн ішінде 15 бар немесе одан жоғары қысымда сақталады. Содан кейін резеңке судан бөлінеді. Бұл әдіс өте тиімді емес, бірақ оны қыздыру арқылы басқа технологияларды қосу арқылы жақсартуға болады [19]. Механикалық күш механикалық девулканизация процесінде ығысу кернеуі әртүрлі байланыстарды үзген кезде қолданылады [24].

Термомеханикалық процесте резеңке үгіндісі алдымен екі орамды диірменге жоғары жылдамдықпен беріледі және біраз уақыт ұнтақталады, мұнда ығысу деформациясы салдарынан температура шамамен 250 °С дейін көтерілуі мүмкін. Ығысу кернеуі мен жылудың біріккен әсері күкірт пен полимерлік тізбектің тігілген байланыстарының кездейсоқ үзілуіне әкеледі [25]. Термомеханикалық девулканизация күкірттің тігілген байланыстарының бақыланатын үзілуі үшін айтарлықтай алға жылжыды. Маридасс пен Гупта [26] екі бұрандалы экструдер көмегімен девулканизация жүргізді және бастапқы табиғи резеңкенің (NC) масс. 65%-на дейін шнектің температурасы мен айналу жылдамдығын бақылай отырып, қайта өңделген резеңкемен ауыстыруға болатынын анықтады. Формела және басқалары [27] төменірек девулканизация температурасы мен пластификатор жүйесі резеңкедегі ығысу деформациясына ықпал ететінін атап өтті, мұнда жоғары бұранда жылдамдығы девулканизация дәрежесін арттырады. Ши және басқалары [28] әртүрлі температураларда қос бұрандалы экструдердің қолданылуын зерттеді және жоғары ығысу кернеуі, температура және оттегі негізгі тізбектің үзілуіне ықпал ету арқылы девулканизацияға кері әсер ететінін хабарлады. Бастапқы тігілу байланыс тығыздығы жоғары материал ең девулканизацияланған материал екенін көруге болады. Демек, күкірт байланыстары көп материалдар термомеханикалық девулканизация кезінде бөлінуге бейім болады [29]. Сегар және басқалары [23] коммерциялық қос бұрандалы экструдердегі термомеханикалық девулканизациядан шамамен 90% резеңке алу туралы хабарлады. Төменгі температура өздігінен қыздыру кезінде материал температурасының жергілікті жоғарылауына байланысты күкірт байланыстарының селективті үзілуіне ықпал етті. Сонымен қатар, девулканизацияланған каучук/тбіріншілік каучук қоспаларының қасиеттеріне өңделген резеңкенің қосылуы айтарлықтай әсер етпейтіні анықталды.

Көлемді қыздыру температураның тез және біркелкі көтерілуін пайдаланатын микротолқынды девулканизация арқылы жүзеге асырылады. Дегенмен, үлкенірек бөлшектер тұтануға және түтінденуге бейім. Химиялық заттар қосылмайды және селективті ыдырау тиісті температурада, әсер ету уақытында және микротолқынды қуатта болуы мүмкін [20, 30]. Шина резеңкесіндегі қара көміртекті микротолқынды сәулеленуді жақсырақ сіңіруді қамтамасыз етеді және жылу түрінде энергияны таратады [31]. Ұзақ уақыт бойына процесті жүргізу жақсы девулканизацияға әкеледі [32]. Девулканизацияланған резеңке шинаның негізгі тізбегі де бұзылады, дегенмен көлденең байланыс тығыздығы төмендейді. Жоғары энергияны сіңіру температураны арттырады, бұл көлденең байланыс тығыздығын төмендетеді [33]. Саймон және басқалары [20] селективті көлденең байланыстың үзілуі төмен температурада және ротор жылдамдығында байқалатынын атап өтті. Негізгі тізбектердің деграациясы және көлденең байланыстардың үзілуі жоғары температура мен ротордың айналу жылдамдығында орын алды [34].

Авторлар [35] жұмыста резеңке үгіндісін девулканизациялаудың 2 әдісін, термиялық ісіну әдісімен девулканизациялау және термомеханикалық девулканизациялауды сипаттаған. Авторлар [2] зерттеуінде катализаторлардың қатысында (неозон Д және наноқұрылымды кремнезоль) жол битумының балқымасындағы резеңке үгінділерінің тиімді девулканизациясы жүргізілді, нәтижесінде резеңке девулканизациясының жоғары дәрежесі бар битумда түзілген сызықтық каучук ереді.

Қазақстандық ғалымдар жол құрылысында асфальт-бетон қоспаларының құрамдас бөлігі ретінде резеңке үгіндісін пайдалануды толық зерттеген жоқ, мысалы, авторлар [36] қазақстандық өндірістің битумдарын модификациялау үшін «ЭКО-ШИНА» ЖШС резеңке үгіндісін қолдану мүмкіндігін көрсетті және 150-170 °C аралықта ПББ дайындаудың оңтайлы температурасын анықтады.

Зерттеулерге сәйкес [37], ароматты қосылыстарға бай битумды негізгі битум ретінде қолданған жөн немесе қажет болған жағдайда резеңке түйіршіктің ісінуіне ықпал ететін ароматты майларды қосқан жөн.


Тотыққан битумды резеңке үгіндімен модификациялау процесінде ең жақсы әсер [38] 10% жұқа резеңке үгіндіні қолдана отырып, 6% май пластификаторымен біріктіріліп, 99-101 °C деңгейінде PG 64-28 маркасының нақты температуралық диапазонын қамтамасыз етті.

Көптеген авторлар резеңке чипті модификацияланған битумды алудың мүмкін сатысына жеткілікті назар аудармаса да, кейбір авторлар [39, 40] барлық компоненттерді бір реттік (бір сатылы) араластыру резеңке чиптің битум модификаторы ретіндегі әлеуетін толық пайдаланбауға әкелуі мүмкін екенін көрсетті, бұл процесті бірнеше кезеңге бөлуді білдіреді. Олардың пікірінше, резеңке үгіндісін қыздырылған битумға және пластификатор майына енгізу қиын. Бұл үлкен порцияларда үгінді резеңкесін енгізу байланыстырғыштың күрт көбіктенуіне және көлемінің 2-3 есе артуына әкеледі, бұл байланыстырғышты нақты өндіруде қауіпті болуы мүмкін. Бұл тәуекелдерді азайту үшін олар бірнеше кезеңде резеңке үгіндісін енгізу нұсқаларын қарастырды. Резеңке-битум байланыстырғышты екі кезеңде дайындаған кезде, резеңке-битум композициясы деп аталатынды алу оңтайлы физикалық және химиялық көрсеткіштерге әкеледі. Бұл битум 230 °C жеткілікті жоғары температураның әсерінен пластикалық қасиеттерін жоғалтпауы үшін қажет. Бастапқы кезеңде битумның жалпы үлесінің жартысынан, ПН-6Ш пластификатор майынан және резеңке үгіндісінен тұратын резеңке-битум суспензиясы дайындалады. Екінші кезеңде битумның екінші жартысы енгізіледі және битум үшін оптималды 105-110 °C температураға дейін төмендетіледі. Нәтижесінде оңтайлы физикалық және химиялық параметрлері бар өнім.

Қорытынды. Сондай-ақ, авторлар [38] қалпына келтірілген жол байланыстырғыштарын (битумдар мен полимер-битум материалдары) өндіру технологиясын әзірледі, оның ішінде мұнай дисперсті агенттердегі (асфальтит) резеңке үгінділерінің жұмсақ термодеструкциясы, массасы 10 : 90, ~180 °C температурада қоспаға элементті күкірт қосу, пайдаланылған массаға 5 % мөлшерінде ҚР және осы қоспаның массасына ~2,8÷3,0% мөлшерінде полимерді енгізу. Алынған қоспа ~50÷52:50÷48 массалық қатынасында ескі битумға енгізіледі.

Композициялық байланыстырғыштың модификаторы ретінде резеңке үгіндісін пайдалану оның физикалық-химиялық қасиеттері мен құрылымын міндетті түрде ескеруді талап етеді, олар айтарлықтай ерекшеленуі мүмкін. Қазіргі уақытта резеңке үгіндісін өндіру технологиясына қарамастан, шина қалдықтары бастапқы резеңкенің химиялық құрамы мен құрылымдық ерекшеліктері ескерілмей, тек диаметрі бойынша сұрыпталады, өйткені гранулометриялық құрамы мен корд қоспаларының сандық көрсеткіші ағымдағы нормаланған дайын өнім сапасының көрсеткіштері. Сондықтан алынған өнімнің соңғы қасиеттері әртүрлі. Бірдей технология бойын-

ша өндірілген резеңке үгіндісі шиналарды өндіруге арналған шикізаттың қасиеттерінің айырмашылығына байланысты айтарлықтай бастапқы айырмашылықтарға ие. Құрылымдық резеңке үгіндісінің дәрежесіне және инертті толтырғыштың мөлшеріне байланысты резеңке-битум байланыстырғыштарын өндіру технологиясын жеке таңдау қажет.

Сондықтан, резеңке техникалық қалдықтарды қайта өндеп кәдеге жаратудың жаңа және тиімді әдістерін әзірлеу керек, олар қоршаған ортаны қорғауға және жақсартылған сападағы жол төсемдерін өндіруге қатысты мәселелерді шешеді. 

Қаржыландыру

Зерттеуді Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігінің Ғылым комитеті қаржыландырды (грант № AP19679081).

ӘДЕБИЕТТЕР

- 1 Боранбаева А.Н., Серикбаева А.К., Иманбаев Е.И., Бусурманова А.Ч., Аккенжеева А.Ш. Снижение нагрузки на окружающую среду с утилизацией нефтешламов на дорожный битум // Экология промышленного производства. – 2022. - №1. – С. 13-17. https://doi.org/10.52190/2073-2589_2022_1_13. [Boranbaeva A.N., Serikbaeva A.K., Imanbaev E.I., Busurmanova A.Ch., Akkenzheeva A.Sh. Snizhenie nagruzki na okruzhayushuyu sredu s utilizatsiej nefteshlamov na dorozhny`j bitum// E`kologiya promy`shlennogo proizvodstva. – 2022. - №1. – S.13-17.]
- 2 Mohajerani A., Burnett L., Smith J.V., Markovski S., Rodwell G., Rahman M.T. et al. Recycling waste rubber tyres in construction materials and associated environmental considerations: A review // Resources, Conservation and Recycling. - 2020. – Vol. 155. – P.104679. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104679>
- 3 Riekstins A., Baumanis J., Barbars J. Laboratory investigation of crumb rubber in dense graded asphalt by wet and dry processes // Construction and Building Materials. - 2021. – Vol. 292. – P.123459. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123459>.
- 4 Picado-Santos, L.G., Capit A.O., Neves S.D. Crumb rubber asphalt mixtures: A literature review // Construction and Building Materials. – 2020. – Vol. 247. – P. 118577. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat>.
- 5 Denneman E., Lee J., Raymond C., Choi Y., Khoo K. Y., Dias M. Optimising the Use of Crumb Rubber Modified Bitumen in Seals and Asphalt // Optimising-the-use-of-crumb-rubber_Yr1-2014-15-Final.pdf (nacoe.com.au). - 2015. – P.31-32.
- 6 Presti Lo, Recycled D.Tyre Rubber Modified Bitumens for road asphalt mixtures: A literature review // Construction and Building Materials. - 2013.- №49. – P.863-881. <https://doi.org/> <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.09.007>
- 7 Group A. P. R. The use of recycled crumb rubber. Rubber-modfd.PDF (austroads. com.au). – 1999.
- 8 Bressi S., Fiorentini N., Huang J., Losa M. Crumb rubber modifier in road asphalt pavements: state of the art and statistics // Coatings. - 2019. - № 9(6). <https://doi.org/10.3390/coatings9060384>.
- 9 Huang B., Mohammad L.N., Graves P.S., Abadie C. Louisiana experience with crumb rubber-modified hot-mix asphalt pavement // Transportation Research Record. - 2002. - № 1789 (1). – P.1–13. <https://doi.org/10.3141/1789-01>
- 10 Li B., Huang W., Tang N., Hu J., Lin P., Guan W., Xiao F., Shan Z.. Evolution of components distribution and its effect on low temperature properties of terminal blend rubberized asphalt

- binder // *Construction and Building Materials*. - 2017. - №136. – P. 598–608. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.01.118>
- 11 Mashaan N. S., Ali A. H., Karim M. R., Abdelaziz M. A Review on Using Crumb Rubber in Reinforcement of Asphalt Pavement // *The Scientific World Journal*. – 2014. - 214612. <https://doi.org/10.1155/2014/214612>
 - 12 Маркова М.А., Машкова А.А., Олихова Ю.В., Осипчик В.С. Влияние модификаторов на свойства дорожных битумных вяжущих // *Успехи в химии и химической технологии*. - 2017. - Т. XXXI. - № 11. - С. 70-72. [Markova M.A., Mashkova A.A., Olikhova Yu.V., Osipchik V.S. Vliyanie modifikatorov na svoystva dorozhny'kh bitumny'kh vyazhushhikh // *Uspekhi v khimii i khimicheskoy tekhnologii*. - 2017. - Т. XXXI. - № 11. - С. 70-72.]
 - 13 Шабаетов С.Н., Иванов С.А., Вахьянов Е.М., Влияние размера резиновой крошки на технологические параметры получения резинобитумного вяжущего // *Молодой ученый*. 2013. № 2 (49). С.75-77. [Shabaev S.N., Ivanov S.A., Vakh'yanov E.M., Vliyanie razmera rezinoy kroshki na tekhnologicheskie parametry' polucheniya rezinobitumnogo vyazhushhego // *Molodoy ucheny'j*. 2013. № 2 (49). S.75-77.]
 - 14 Карпенко А. В., Духовный Г. С., Мирошниченко С. И., Резинобитумное вяжущее, основные показатели и перспективы использования // *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. - 2012. - № 1. - С. 22-24. [Karpenko A. V., Dukhovny'j G. S., Miroshnichenko S. I., Rezinobitumnoe vyazhushhee, osnovny'e pokazateli i perspektivy' ispol'zovaniya // *Vestnik BGTU im. V.G. Shukhova*. - 2012. - № 1. - С. 22-24.]
 - 15 Никольский, В. Г., Красоткина И.А. "Унирем" и другие модификаторы // *Автомобильные дороги*. – 2010. – № 3. – С. 28-29. [Nikol'skiy, V. G., Krasotkina I.A. "Unirem" i drugie modifikatory' // *Avtomobil'ny'e dorogi*. – 2010. – № 3. – С. 28-29.]
 - 16 Петров В.К. Вяжущие и резиноасфальтобетоны БИТРЕК. Опыт применения // ООО НПГ «ИНФОТЕХ». Москва: Норма. - 2014. - С. 15-20. [Petrov V.K. Vyazhushhie i rezinoasfal'tobeton'y BITREK. Opy't primeneniya // ООО NPG «INFOTEKh». Moskva: Norma. - 2014. - С. 15-20.]
 - 17 Cheovits JG, Dunning RL, Morris GR. Characteristics of asphalt-rubber by the slide plate microviscometer // *Association of Asphalt Paving Technologists*. – 1982. - Vol. 51.- P. 240–61.
 - 18 Копотилов А. Утильная резина – ресурс для модификации вяжущих // *Дороги России*. - 2021. - № 3 (123). - С. 4-11. [Kopotilov A. Util'naya rezina – resurs dlya modifikatsii vyazhushhikh. *Dorogi Rossii*. – 2021.- № 3 (123). - С. 4-11.]
 - 19 Saputra R., Walvekar R., Khalid M., Mubarak N. M., Sillanpa M. Current progress in waste tire rubber devulcanization // *Chemosphere*. - 2021. - № 265. – P.129033.
 - 20 Simon D.A., Pirityi D.Z., Barany T. Devulcanization of ground tire rubber: microwave and thermomechanical approaches // *Scientific Reports*. – 2020. - №10 (1). – P. 1–13.
 - 21 Ramarad S., Khalid M., Ratnam C., Chuah A.L., Rashmi W. Waste tire rubber in polymer blends: A review on the evolution, properties and future// *Prog. Chem. Org. Nat. Prod. in Materials Science*. - 2015. - № 72. – P. 100–140.
 - 22 Sabzekar M., Chenar M.P., Mortazavi S.M., Kariminejad M., Asadi S., Zohuri G. Influence of process variables on chemical devulcanization of sulfur-cured natural rubber // *Polymer Degradation Stability*. - 2015. - № 118. – P. 88–95.
 - 23 Seghar S., Asaro L., Rolland-Monnet M., Hocine N.A. Thermo-mechanical devulcanization and recycling of rubber industry waste // *Resources, Conservation and Recycling*. - 2019. - №144. – P. 180–186.
 - 24 Edwards D.W., Danon B., van der Gryp P., Gorgens J.F. Quantifying and comparing the selectivity for crosslink scission in mechanical and mechanochemical devulcanization processes // *J. Appl. Polym. Sci*. – 2016. - №133 (37).

- 25 Adhikari B., De D., Maiti S. Reclamation and recycling of waste rubber // Prog. Chem. Org. Nat. Prod. in polymer science . - 2000. - № 25 (7). – P. 909–948.
- 26 Maridass B., Gupta B.R. Effect of extruder parameters on mechanical properties of revulcanized ground rubber tire powder// Polimery. - 2007. - № 52 (06). – P. 456–460.
- 27 Formela K., Cysewska M., Haponiuk J., Stasiek A. The influence of feed rate and shear forces on the devulcanization process of ground tire rubber (GTR) conducted in a co-rotating twin screw extruder // Polimery. - 2013. - №58 (11–12). – P. 906–912.
- 28 Shi J., Jiang K., Ren D., Zou H., Wang Y., Lv X., Zhang L. Structure and performance of reclaimed rubber obtained by different methods. J. Appl. Polym. Sci. – 2013. -№129 (3). – P. 999–1007.
- 29 Barbosa R., Nunes A.T., Ambrosio J.D. Devulcanization of natural rubber in composites with distinct crosslink densities by twin-screw extruder // Mater. Res. – 2017. -№2020. – P. 77–83.
- 30 Simon D.A., Purity D., Tamas-Benyei P., Barany, T. Microwave devulcanization of ground tire rubber and applicability in SBR compounds // J. Appl. Polym. Sci. – 2020. - №137 (6). – P.48351.
- 31 Jones D.A., Lelyveld T., Mavrofidis S., Kingman, S., Miles, N. Microwave heating applications in environmental engineering—a review. Resources // Conservation and Recycling. - 2020. - №34 (2). –P.75–90.
- 32 Colom, X., Faliq, A., Formela, K., Canavate, J. FTIR spectroscopic and thermogravimetric characterization of ground tyre rubber devulcanized by microwave treatment // Polymer Testing. - 2016. - №52. – P.200–208.
- 33 Formela, K., Korol, J., Saeb, M.R.. Interfacially modified LDPE/GTR composites with non-polar elastomers: From microstructure to macro-behavior// Polymer Testing. 2015.- №42. – P. 89–98.
- 34 De Sousa, F.D., Scuracchio, C.H., Hu, G.-H., Hoppe, S. Devulcanization of waste tire rubber by microwaves // Polymer Degradation Stability . – 2017. - №138. – P.169–181.
- 35 Беляев П.С., Забавников М.В., Маликов О.Г., Волков Д.С. Исследование влияния резиновой крошки на физико-механические показатели нефтяного битума в процессе его модификации // Вестник ТГТУ. - 2005. - Т.11. - № 4. - С.923- 930. [Belyaev P.S., Zabavnikov M.V., Malikov O.G., Volkov D.S. Issledovanie vliyaniya rezinovoj kroszki na fiziko-mekhanicheskie pokazateli neftyanogo bituma v proczesse ego modifikaczii // Vestnik TGTU. 2005. T.11. № 4. S.923- 930.]
- 36 Сырманова К.К., Алипбекова Ж.К., Калдыбекова Ж.Б., Байжанова Ш.Б., Боташев Е.Т., Агабекова А.Б. Перспективы применения резиновой крошки ТОО «Эко-шина» в качестве компонента асфальтобетонных смесей дорожном строительстве // Сборник материалов научной конференции «Тонкий органический синтез-2021» - Алматы. - 2021. [Sy`rmanova K.K., Alipbekova Zh.K., Kaldy`bekova Zh.B., Bajzhanova Sh.B., Botashev E.T., Agabekova A.B. Perspektivy` primeneniya rezinovoj kroszki TOO «E`ko-shina» v kachestve komponenta asfal`tobetonn`kh smesey dorozhnom stroitel`stve// Sbornik materialov nauchnoj konferenczii «Tonkij organicheskiy sintez-2021». - Almaty, - 2021.]
- 37 Sienkiewicz M., Borzędowska-Labuda K., Wojtkiewicz A., Janik H. Development of methods improving storage stability of bitumen modified with ground tire rubber: A review // Fuel Processing Technology. – 2017. -Volume 159. - P. 272-279.
- 38 Тюкилина П.М. Комплексное технологическое регулирование производства современных дорожных битумных вяжущих // Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. Москва. - 2021. [Tyukilina P.M. Kompleksnoe

tehnologicheskoe regulirovanie proizvodstva sovremenny`kh dorozhny`kh bitumny`kh vyazhushhikh// Dissertacziya na soiskanie uchenoj stepeni doktora tekhnicheskikh nauk. Moskva.- 2021.]

- 39 Тюрюханов К.Ю. Утилизация резиновой крошки путем производства модифицированного битума // Инженерный вестник Дона. -2022. - № 9. [Tyuryukhanov K.Yu.. Utilizacziya rezinovej kroszki putem proizvodstva modificirovannogo bituma// Inzhenerny`j vestnik Dona. -2022. - № 9]
- 40 Иванов С.А., Шабает С.Н., Исследование влияния стадийности технологического процесса получения композиционных резинобитумных вяжущих на их свойства// Вестник ТГАСУ. -2016. - № 4. – С. 153-158. [Ivanov S.A., Shabaev S.N., Issledovanie vliyaniya stadijnosti tehnologicheskogo proczessa polucheniya kompoziczionny`kh rezinobitumny`kh vyazhushhikh na ikh svojstva// Vestnik TGASU. -2016.- № 4. – S. 153-158.]