



УДК 691.16

doi: 10.55287/22275398_2026_60_13

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ РАЗРАБОТКИ БИТУМНЫХ ЭМУЛЬСИЙ, УСТОЙЧИВЫХ К ЦИКЛАМ ЗАМОРАЖИВАНИЯ-ОТТАИВАНИЯ

М. А. Высоцкая
О. Н. Войтенко

Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова, г. Белгород

Аннотация

В статье представлено экспериментально-теоретическое обоснование разработки битумных эмульсий, способных сохранять технологическую работоспособность после циклов замораживания-оттаивания. Актуальность обусловлена необходимостью строительства и содержания автомобильных дорог в Арктической зоне и регионах РФ с резко континентальным климатом. В работе выдвинута гипотеза о возможности двухбарьерной стабилизации эмульсий за счет синергии электростатического отталкивания (ДЭС) и структурно-механического барьера (АСС). Проведен скрининг пяти эмульгаторов с использованием ИК-спектроскопии и физико-химических методов. Наиболее перспективным признан катионный модифицированный лигнин Indulin W-5. На его основе разработана эмульсия и оценено изменение ключевых показателей после 20 циклов замораживания-оттаивания. Экспериментально подтверждено, что сохранение свойств битумной эмульсии возможно до 15 циклов, после чего происходит деградация системы вследствие коалесценции глобул и нарушения межфазных слоев.

Ключевые слова

Битумные эмульсии, эмульгаторы, кинетическая стабильность, замораживание-оттаивание.

Дата поступления в редакцию

19.08.2026

Дата принятия к печати

01.09.2026

Развитие дорожного строительства в северных и резко континентальных регионах Российской Федерации (РФ) связано с выполнением работ в сложных климатических условиях. Для таких территорий характерны продолжительный холодный период, значительные отрицательные температуры и резкая сезонная изменчивость температуры воздуха, что ограничивает строительный сезон и диктует повышенные требования к устойчивости дорожных композитов к воздействию влаги и циклам замораживания и оттаивания (ЗО) [1]. Актуальность проблемы усиливается развитием Арктической зоны РФ и северных транспортных направлений. В стратегических документах [1] развитие транспортной и дорожной инфраструктуры Арктической зоны до 2035 г. рассматривается как одно из условий ее социально-экономического развития. Дополнительно утверждены долгосрочные планы комплексного разви-

тия ряда арктических агломераций. Таким образом, необходимость материалов и технологий, способных сохранять работоспособность в условиях нестабильного температурного режима — очевидна.

Один из ключевых материалов холодных дорожных технологий — битумные эмульсии (БЭ). Как вододержащие дисперсные системы, они сохраняют технологическую пригодность при устойчивости битумных глобул, стабильности межфазного слоя, требуемой дисперсности, вязкости, смачивающей способности и управляемом распаде [2, 3], например, в составе органо-минеральных смесей (ОМС). Однако, их применение при частом переходе температуры через 0°C ограничено. При замораживании водная фаза кристаллизуется, нарушается равновесие межфазной оболочки битумных глобул. Оттаивание БЭ сопровождается флокуляцией, коалесценцией, расслоением и, как следствие, нарушением управляемого распада эмульсии [4].

Таким образом, разработка битумной эмульсии, способной сохранять технологическую работоспособность после циклов замораживания-оттаивания, является актуальной научно-практической задачей. Стоит отметить, что под сохраняемостью понимается не абсолютная неизменность эмульсии и не предотвращение замерзания водной фазы, а ее способность после ограниченного низкотемпературного воздействия оставаться пригодной для применения.

Целью исследования является теоретико-экспериментальное обоснование гипотезы о возможности сохранения технологической работоспособности битумной эмульсии после циклов замораживания-оттаивания. В процессе выполнения работы решались следующие задачи: обоснование теоретической гипотезы о возможности сохранения или восстановления свойств БЭ после циклов замораживания-оттаивания (ЗО); поиск эмульгатора, соответствующего гипотезе, подбор состава БЭ, экспериментальное подтверждение гипотезы.

С позиции коллоидной химии, дорожные битумные эмульсии — это микрогетерогенные дисперсные системы, где дисперсная фаза (битум) распределена в водной среде в виде микрокапель или глобул, а устойчивость обеспечивается посредством адсорбционного слоя из ПАВ и механизмами электростатической или стерической стабилизации. В основе существования эмульгированных систем лежат две фундаментальные теории [5, 6]: двойного электрического слоя (ДЭС) и Дерягина-Ландау-Фервея-Овербека (ДЛФО). Каждая из теорий описывает отраслевую проблематику, сопряженную с тем, что равновесие эмульсии — это не термодинамическое равновесие, когда система стремится к расслоению с уменьшением свободной энергии Гиббса, а кинетическая стабильность. В упрощенном виде, каждая глобула битума в процессе эмульгирования покрывается «коконом» из ПАВ с характерным зарядом на поверхности. Глобулы отталкиваются друг от друга, под влиянием электростатического отталкивания, что предотвращает их коалесценцию [5, 7]. Строение и основные элементы ДЭС схематично показаны на **рис. 1**. В дорожных БЭ состояние ДЭС не постоянно [8, 9], и является не только фактором устойчивости, но и основным механизмом управляемого распада эмульсии.

Для понимания стабилизации дисперсных систем на разных уровнях необходимо выявлять и понимать причинно-следственные связи между тремя ключевыми понятиями: АСС (адсорбционно-сольватным слоем), ДЭС и ККМ (критической концентрацией мицеллообразования) [5]. В общем виде, АСС — это структурно-механический барьер из молекул ПАВ, ДЭС был рассмотрен ранее, а ККМ — это порог появления в системе мицелл. Графически структурные элементы БЭ, определяющие ее устойчивость, изображены на **рис. 2**.

Таким образом, АСС обеспечивает блокировку глобул битума при случайном контакте, не давая им слипнуться, а обеспечивает их отталкивание на расстоянии — ДЭС, не позволяя глобулам сближаться. Учитывая разницу в механизме формирования и дальности действия этих барьеров можно предположить, что синергетический эффект их совместного действия позволит регулировать кинетическую устойчивость БЭ и формировать структуры, недостижимые при доминировании только одного механизма стабилизации.

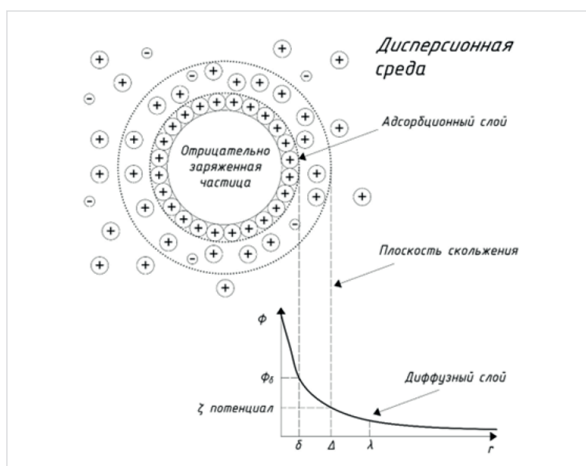


Рис. 1. Структура ДЭС [5, 7]

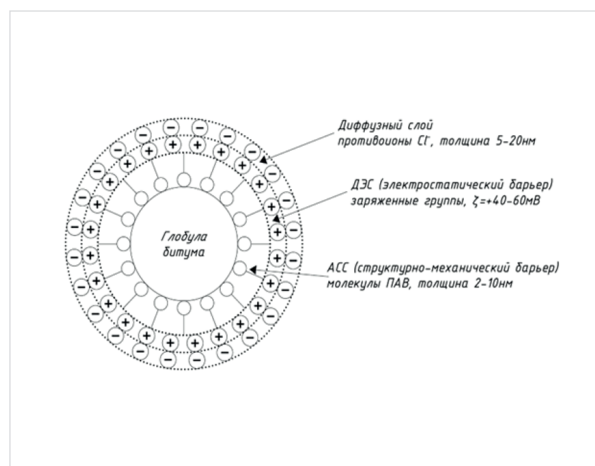


Рис. 2. Расположение структурных элементов БЭ

В прикладном отношении это означает, что использование композиции эмульгаторов, различного спектра действия, потенциально позволяет получать неочевидные эффекты стабилизации. Так, если ДЭС формируется четвертичными аммониевыми группами, создающими положительный заряд и обеспечивающими электростатическое раздвижение глобул битума, а АСС формируется мономерами разветвленного полимера, образующими на поверхности глобул упругий структурно-механический барьер, можно предположить возникновение синергии этих механизмов. В таком случае, даже при частичном сжатии или ослаблении диффузной части ДЭС, подключится АСС, выполняющий функцию ближнего структурно-механического барьера. Сформированный мономерами полимера АСС может препятствовать непосредственному контакту битумных фаз и снижать вероятность необратимой коалесценции при переходе водной фазы в лед, и продолжит физически препятствовать коалесценции капель, а после оттаивания способствовать восстановлению структуры БЭ. Следовательно, совместное формирование ДЭС и АСС допустимо рассматривать как одно из перспективных направлений повышения кинетической устойчивости БЭ, в том числе в условиях ЗО. Однако, такой механизм не следует трактовать как антифризный эффект, полностью предотвращающий замерзание водной фазы. Речь идет о повышении обратимости структурных изменений после ЗО и сохранении технологической работоспособности эмульсии после ограниченного числа циклов. Предлагаемая двухбарьерная модель сохраняемости БЭ после ЗО представлена на рис. 3.

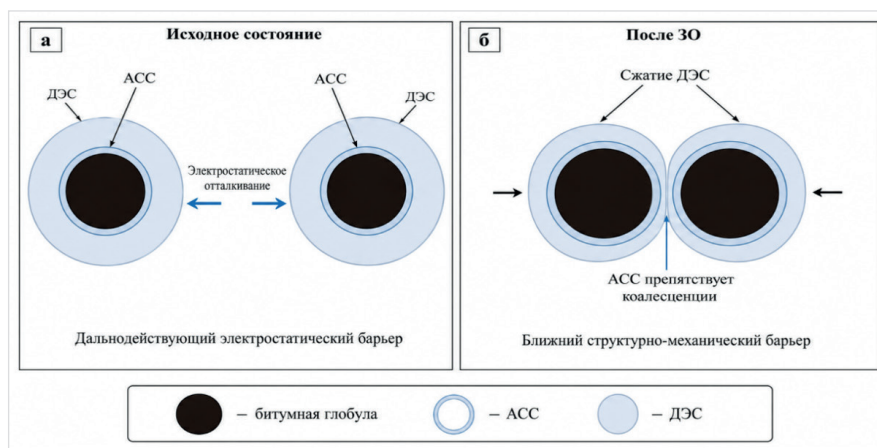


Рис. 3. Двухбарьерная модель сохраняемости БЭ после циклов ЗО

Таким образом, согласно гипотезе, суммарный стабилизирующий эффект в БЭ можно представить как результат совместного действия электростатического отталкивания, Ван-дер-Ваальсового притяжения и структурно-механического вклада АСС (1):

$$U_{\text{общ}}(h) = U_{\text{ДЭС}}(h) + U_{\text{В-Д-В}}(h) + U_{\text{АСС}}(h), \quad (1)$$

где $U_{\text{ДЭС}}(h)$ — вклад электростатического отталкивания;

$U_{\text{В-Д-В}}(h)$ — вклад Ван-дер-Ваальсового притяжения;

$U_{\text{АСС}}(h)$ — вклад адсорбционно-сольватного слоя;

h — расстояние между поверхностями сближающихся глобул.

Результаты исследования

В рамках представленной работы исследовались эмульгаторы: Indulin W-5, ДОРОС ЭМ+, АЗОЛ 1022, Адгезол ЭМ-3 и ЭМБИТ БС. Сводная характеристика эмульгаторов приведена в **табл. 1**. Так же был выполнен их ИК-спектральный анализ.

Таблица 1

Эмульгаторы, используемые в работе

Эмульгатор	Тип / характеристика	Рекомендуемая дозировка
Indulin W-5	Катионный эмульгатор для БЭ медленного распада; продукт модифицирования катионного лигнина	1,0 – 1,8% масс.
ДОРОС ЭМ+	Катионный эмульгатор для получения катионных БЭ; требует кислой водной фазы	0,2 – 1,5% масс.
АЗОЛ 1022	Анионный эмульгатор для медленнораспадающихся БЭ; требует щелочной водной	1,0 – 1,2% масс.
Адгезол ЭМ-3	Катионный эмульгатор специального назначения для медленнораспадающихся БЭ;	0,8 – 1,5% масс.
ЭМБИТ БС	Катионный эмульгатор для различного типа распада, применим как эмульгатор и адгезионная добавка	1,0 – 1,5%

Для рассматриваемых эмульгаторов характерны следующие соединения (обобщенно): Indulin W-5 — вторичные амины карбоновых кислот и алифатические эфиры наряду с эпокси-соединениями; ДОРОС ЭМ+ — вторичные амиды карбоновых кислот, нитроамины, эфиры, в том числе кетали и ацетали; АЗОЛ 1022 — простые эфиры, возможные эпокси-соединения, первичные амиды ненасыщенных жирных кислот разветвленного строения; Адгезол ЭМ-3 — вторичные алифатические амины, нитроамины разветвленной структуры, органические нитросоединения, эфиры, возможные перекисные фрагменты, разветвленные кетоны; ЭМБИТ БС — ароматические амины и их соли, сложные ароматические эфиры, в том числе фрагменты с эпокси-группой.

По предварительной оценке, наиболее перспективный эмульгатор — Indulin W-5, модифицированный катионный лигнин. Исходный лигнин — это природный гетерогенный ароматический полимер из фенилпропановых звеньев. В его структуре присутствуют фрагменты гваяцильного, сирингильного и п-гидроксифенильного типа с эфирными и углерод-углеродными связями. Получение катионированных лигнинов для БЭ связан с введением азотсодержащих функциональных групп, обеспечивающих положительный заряд в водной фазе. Модификация лигнина осуществляется по реакции Манниха [10], с вводом аминотетильные групп в ароматическое кольцо или боковую цепь. В результате в структуре макромолекулы появляются катионные центры.

Предварительная перспективность Indulin W-5 обусловлена совокупностью принципиальных для подтверждения гипотезы структурных признаков: гидрофобная природа лигнинового остова — ароматические кольца и углеводородные фрагменты способствуют закреплению эмульгатора на поверхности битумной фазы; разветвленная полимерная структура, способная формировать пространственный АСС и создавать стерический барьер между глобулами; катионные азотсодержащие центры, проявляющие в кислой среде положительный заряд и участвующие в формировании ДЭС.

В приготовлении битумной эмульсии использовались битум БНД 100/130 производства АО «Газпромнефть-ОНПЗ» с пенетрацией 102 мм-1, температурами размягчения и хрупкости 45,2°С и –28°С соответственно, техническая вода, соляная кислота 37% или натр едкий технические.

БЭ приготавливалась на установке «Давиал». Битумное вяжущее нагревалось до рабочей температуры, обеспечивающей его жидкотекучее состояние, водная фаза включала нагретую техническую воду с эмульгатором, для нее контролировалось значение pH. За критерии предварительного отбора эмульсий принимались: медленный распад, соответствие требованиям [3] и совместимость с цементом. Рецептуры эмульсий и показатели их свойств приведены в *табл. 2* и *3*, соответственно.

Таблица 2

Рецептуры исследуемых битумных эмульсий

Эмульгатор	№ состава	БНД 100/130, %	Эмульгатор, %	Вода техническая, %	Корректирующая добавка, %
Indulin W-5	1	60,00	0,80	39,10	HCl 37% – 0,10
	2	60,00	1,60	38,30	HCl 37% – 0,20
	3	60,00	2,50	37,30	HCl 37% – 0,20
ДОРЭС ЭМ+	1	60,00	1,00	38,50	HCl 37% – 0,60
	2	60,00	1,50	36,60	HCl 37% – 1,90
	3	60,00	2,00	36,60	HCl 37% – 1,90
АЗОЛ 1022	1	60,00	0,70	39,10	NaOH – 0,20
	2	60,00	1,20	38,40	NaOH – 0,40
	3	60,00	1,50	38,00	NaOH – 0,50
Адгезол ЭМ-3	1	60,00	0,80	39,16	HCl 37% – 0,04
	2	60,00	1,50	38,46	HCl 37% – 0,04
ЭМБИТ БС	1	60,00	1,00	38,50	HCl 37% – 0,50
	2	60,00	1,50	37,70	HCl 37% – 0,80
	3	60,00	2,00	37,00	HCl 37% – 1,00

При изготовлении эмульсий контролировалась температура и расход компонентов. Это обеспечивало сопоставимость полученных результатов.

Таблица 3

Показатели свойств БЭ

Эмульгатор	№ сост.	Индекс распада	Содержание Б+эм., %	Остаток на сите мм, %	Условная вязкость, с	pH БЭ	Цем. тест	Класс распада
Indulin W-5	1	244	58,5	0,09	6,4	2,24	+	С
	2	320	61	0,06	6,8	2,02	+	М
	3	398	61	0,01	7,0	2,31	+	М

ДОРОС ЭМ+	1	250	61	0,05	6,4	2,29	+	С
	2	261	60	0,08	6,6	2,38	+	М
	3	262	60	0,02	7,0	2,40	+	М
АЗОЛ 1022	1	271	60,5	0,25	7,21	10,39	–, 12 с	М
	2	243	60	0,09	6,0	10,95	–, 17 с	С
	3	403	63	0,08	9,46	10,25	–, 12 с	М
Адгезол ЭМ-3	1	247	60	0,08	6,8	2,43	+	С
	2	262	59	0,06	6,8	2,67	+	М
ЭМБИТ БС	1	232	60	0,09	7,0	2,32	–, 6 с	С
	2	240	59	0,11	6,9	2,56	–, 18 с	С
	3	267	59	0,08	7,6	2,23	–, 28 с	М

Представляет интерес зависимость индекса распада опытных БЭ от содержания эмульгатора. В соответствии с [3] — границами перехода к среднераспадающимся и медленнораспадающимся эмульсиям является индекс распада, который составляет 201 и 260 соответственно. Устойчивый рост показателя виден для БЭ на Indulin W-5; для ДОРОС ЭМ+ и Адгезол ЭМ-3.

Полученные составы были подвергнуты одному циклу ЗО, который включал выдерживание БЭ при температуре –20°С в течение 4 ч и последующее оттаивание на воздухе при температуре +22°С в течение 20 ч. Эмульсия помещалась в 3-х литровую полимерную канистру для оценки изменения состояния БЭ в объеме.

Предварительный эксперимент продемонстрировал, что пилотный цикл ЗО выдержали только составы БЭ на Indulin W-5 с концентрацией 1,6 и 2,5%, сохранившие целостность после низкотемпературного воздействия. За рабочий состав была принята серия с концентрацией эмульгатора 1,6%. После оценки свойств БЭ был выполнен анализ изменения ее показателей после циклов ЗО. Результаты испытаний БЭ после циклов ЗО приведены в *таблице 4*.

Таблица 4

Изменение основных показателей БЭ после циклов ЗО

Циклы ЗО	Индекс распада	Содержание битумного вяжущего с эмульгатором, %	Температура размягчения остаточного вяжущего, °С	Остаток на сите № 014, %	Условная вязкость, с	Интерпретация состояния после ЗО
0	296	62	47	0	22	исходное
5	256	62	48	2,05	–	работоспособное с появлением крупной фазы
10	243	61	48	6,10	–	работоспособное с увеличением крупной фазы
15	202	60	49	9,90	–	предельное работоспособное
20	150	59	49	14,30	45	критическое с выраженным ростом фазы

Как видно, индекс распада последовательно снижается с увеличением количества циклов ЗО. Исходный показатель составляет 296, после 10 и 15 циклов уменьшается до 243 и 202 соответственно. Эти значения находятся в диапазоне 201 – 260, соответствующему среднераспадающимся эмульсиям [3].

Снижение индекса распада после циклов ЗО показывает, эмульсия теряет запас устойчивости при контакте с минеральным материалом, что очевидно связано с нарушением состояния межфазной оболочки битумных глобул. При замораживании водная фаза кристаллизуется, растворенные компоненты концентрируются в незамерзших прослойках, а после оттаивания часть глобул оказывается менее устойчивой к воздействию минерального материала. Сопутствующее увеличение показателя остатка на сите № 014 демонстрирует нарушение однородности и появление крупной агрегированной фазы. Что свидетельствует не о переходе эмульсии в другую нормативную марку, а о деградиционном изменении характера распада.

После 20 циклов ЗО индекс распада снижается до 150, что указывает на глубокое нарушение управляемости распада, а вязущее не может рассматриваться как пригодное для дальнейшего приготовления ОМС. Можно предположить, что изменение показателя связано с частичной перестройкой эмульсии: коалесценцией битумных глобул, укрупнением дисперсной фазы, изменением однородности остаточного вязущего после выделения из эмульсии и возможным перераспределением компонентов водной фазы и эмульгатора.

Полученный результат по остатку на сите не следует трактовать как самостоятельный признак потери работоспособности БЭ так как был получен после мягкого перемешивания системы, при дополнительной интенсивной гомогенизации рыхлые агрегаты (до 15 циклов ЗО) разрушались и перераспределялись в объеме эмульсии. Поэтому в работе рост остатка на сите рассматривается как признак частичной агрегативной перестройки БЭ или бифуркации после ЗО, а не как единственный критерий ее непригодности. Для более детальной оценки состояния эмульсии после ЗО был выполнен анализ дисперсного состава. Изменение среднего размера частиц в зависимости от числа циклов ЗО приведено на **рис. 4**.

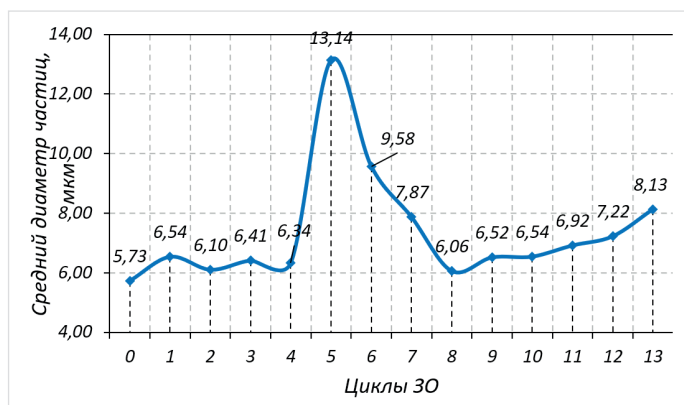


Рис. 4. Динамика изменения среднего размера частиц БЭ от циклов ЗО

Из рисунка видно, что в исходном состоянии средний размер частиц составляет 5,734 мкм. После 5 циклов наблюдается резкий скачок среднего размера частиц до 13,14 мкм. Это значение более чем в два раза превышает исходный уровень и указывает на существенное укрупнение дисперсной фазы. Такое изменение согласуется с ростом остатка на сите № 014 и снижением индекса распада после 5 циклов. Следовательно, именно после 5 циклов фиксируется переход от относительно стабильного состояния к выраженной агрегативной деградаци эмульсии. После 5 циклов средний размер частиц снижается, однако полного возврата к исходному состоянию не происходит. Это не следует трактовать как восстановление эмульсии. Подобные перестройки могут являться признаками бифуркации, проявляющейся в структуре после достижения критического состояния, когда после 5 циклов ЗО в эмульсии начинают развиваться процессы флокуляции и коалесценции, которые затем частично

маскируются перераспределением частиц, но в целом свидетельствуют о нарушении дисперсной структуры.

Заключение

Таким образом, циклы ЗО в первую очередь влияют на показатели, связанные с агрегативным и дисперсным состоянием БЭ. При этом содержание битумного вяжущего с эмульгатором и температура размягчения остаточного вяжущего изменяются слабее. Следовательно, низкотемпературное воздействие приводит преимущественно не к изменению состава органической фазы, а к перестройке эмульсионной системы: укрупнению части битумных глобул, появлению агрегированных включений и росту внутреннего сопротивления течению. Полученные результаты согласуются с выдвинутой гипотезой о возможности двухбарьерной стабилизации БЭ после циклов ЗО. Реализация гипотезы была выполнена посредством эмульгатора Indulin W-5 с концентрацией 1,6%. Показано, что сохраняемость свойств БЭ после циклов ЗО возможна, однако имеет ограниченный характер в диапазоне до 15 циклов ЗО.

Библиографический список

1. О Стратегии развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2035 года: указ Президента Российской Федерации от 26.10.2020 № 645. — URL: <https://docs.cntd.ru/document/566091182> (дата обращения: 20.07.2026). — Текст: электронный.
2. Review of emulsified asphalt modification mechanisms and performance influencing factors / Y. Meng, J. Chen, W. Kong, Y. Hu // *Journal of Road Engineering*. — 2023. — Vol. 3, No. 2. — P. 141 – 155. — DOI 10.1016/j.jreng.2023.01.006.
3. ГОСТ Р 58952.1-2020. Дороги автомобильные общего пользования. Эмульсии битумные дорожные. Технические требования. — URL: <https://docs.cntd.ru/document/573156105> (дата обращения: 20.07.2026). — Текст: электронный.
4. Effects of Freeze-Thaw Cycles on Performance and Microstructure of Cold Recycled Mixtures with Asphalt Emulsion / Ye. Yang, Z. Sun, Ya. Yang [et al.] // *Coatings*. — 2022. — Vol. 12, No. 6. — P. 802. — DOI 10.3390/coatings12060802.
5. Tadros, T. F. Formulation Science and Technology. Vol. 1. Basic Theory of Interfacial Phenomena and Colloid Stability / T. F. Tadros. — Berlin; Boston: De Gruyter, 2018. — 430 p. — Текст: электронный // Электронная библиотека Финансового университета: [сайт]. — URL: <http://elib.fa.ru/ebSCO/1819489.pdf> (дата обращения: 20.07.2026). — Режим доступа: для авторизир. пользователей.
6. Рокас Родригес, И. М. Образование, стабилизация и разделение водонефтяных эмульсий: учебно-методическое пособие / И. М. Рокас Родригес. — Казань: Казанский федеральный университет, 2024. — 73 с. — Текст: электронный // Казанский федеральный университет: [сайт]. — URL: https://kpfu.ru/staff_files/F_1302247063/Rokhas_Rodriges_I.M._Uchebno_metodicheskoe_posobie__Emulsiya_27.06_2.pdf (дата обращения: 20.07.2026).
7. Moran, K. Roles of interfacial properties on the stability of emulsified bitumen droplets / K. Moran // *Langmuir*. — 2007. — Vol. 23, № 8. — P. 4167 – 4177. — DOI: 10.1021/la063290r.

8. Коротков, А. В. Исследование влияния типа минеральной подложки и эмульгатора в составе водной фазы для битумных эмульсий на Краевой угол смачивания / А. В. Коротков, М. А. Высоцкая // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова. — 2016. — № 2. — С. 6–10.
9. Extraction and characterization of surfactants from atmospheric aerosols / B. Nozière, V. Gérard, C. Ferronato, C. Baduel // Journal of Visualized Experiments. — 2017. — Vol. 2017, No. 122. — P. e55622. — DOI 10.3791/55622.
10. Probing the stability of emulsified asphalts: A dual analysis of zeta potential and particle size / Z. Yang, Ch. Jiang, Q. Xiang [et al.] // Fuel. — 2025. — Vol. 396. — P. 135266. — DOI 10.1016/j.fuel.2025.135266.

EXPERIMENTAL AND THEORETICAL SUBSTANTIATION OF THE DEVELOPMENT OF BITUMINOUS EMULSIONS RESISTANT TO FREEZE-THAW CYCLES

M. A. Vysotskaya
O. N. Voitenko

Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov, Belgorod

Abstract

The paper presents an experimental and theoretical substantiation for the development of bitumen emulsions capable of maintaining technological performance after freeze thaw cycles. The relevance is driven by the need for road construction and maintenance in the Arctic zone and regions of the Russian Federation with a sharply continental climate. The study proposes a hypothesis on the possibility of dual barrier stabilisation of emulsions through the synergy of electrostatic repulsion (electric double layer, EDL) and a structural mechanical barrier (adsorption solvate layer, ASL). A screening of five emulsifiers was carried out using IR spectroscopy and physicochemical methods. The cationic modified lignin Indulin W 5 was identified as the most promising candidate. Based on this emulsifier, an emulsion was formulated, and the changes in key performance indicators were evaluated after 20 freeze thaw cycles. It was experimentally confirmed that the properties of the bitumen emulsion can be preserved for up to 15 cycles, beyond which degradation of the system occurs due to globule coalescence and disruption of the interphase layers.

The Keywords

Bitumen emulsions, emulsifiers, kinetic stability, freeze thaw cycles.

Date of receipt in edition

19.08.2026

Date of acceptance for printing

01.09.2026

Ссылка для цитирования:

М. А. Высоцкая, О. Н. Войтенко. Экспериментально-теоретическое обоснование разработки битумных эмульсий, устойчивых к циклам замораживания-оттаивания. — Системные технологии. — 2026. — № 3 (60). — С. 13–21.