

ВЛИЯНИЕ ЦИКЛИЧЕСКОГО ЗАМОРАЖИВАНИЯ-ОТТАИВАНИЯ НА МОДУЛЬ УПРУГОСТИ АСФАЛЬТОБЕТОНА

Д-р техн. наук, профессор **В.А. Золотарев**,
аспирант **Я.В. Ильин**
(Харьковский национальный
автомобильно-дорожный университет)
Конт. информация: vvm@khadi.kharkov.ua;
ya_ilin@mail.ru;
yail-in12011993@gmail.com

В статье рассмотрено влияние циклического замораживания-оттаивания и последующего отдыха на изменения модулей упругости асфальтобетона. Показана зависимость коэффициента морозостойкости от температурно-временных условий испытания. Обнаружен эффект частичного возвращения модуля к исходным значениям.

Высказано предположение об использовании линейного вязкоупругого деформирования в качестве неразрушающего метода определения морозостойкости асфальтобетонов.

Ключевые слова: асфальтобетон, морозостойкость, линейная вязкоупругость, модуль упругости, тепловое восстановление.

Циклическое замораживание и оттаивание (ЦЗО) является активным фактором разрушения асфальтобетона в дорожных покрытиях в странах с континентальным климатом. Несмотря на очевидные после каждого зимнего сезона разрушения в виде шелушения, выкрашивания, выбоин, способность асфальтобетонов противостоять этому разрушению, его причины и процессы, происходящие при этом, изучены несравнимо меньше, чем низкотемпературное трещинообразование [1-5]. Сложность этих процессов усугубляется действием множества факторов, главными из которых являются: понижение температуры, стеклование битумного вяжущего и замерзание воды. При этом асфальтобетон из двухфазной системы становится трехфазной (добавляется вода), а затем, после льдообразования, четырехфазной [6]. Это сопровождается переходом его из вязкоупругого состояния в упругое, а затем хрупкое при снижении температуры ниже критической величины, что в свою очередь зависит от битумного вяжущего (консистенции, марки, пене-трации, вида), а также соотношения между содержанием дисперсного минерального порошка и вяжущего. На температурные микронапряжения накладываются процессы, связанные с водой. С понижением температуры меняется плотность, степень структурирования, смачивающая

способность и ее состояние на границах раздела фаз с поверхностью каменных материалов и стенками битумных поверхностей и капилляров. Образующийся лед может быть аморфным, кристаллическим и анизотропным.

Влияние комплекса этих процессов может приводить к изменению механических свойств асфальтобетона в зависимости от скорости понижения температуры. Д.И. Гегелия [4], на основе наблюдения за 11-ью участками на улицах Москвы, показал, что коэффициенты фильтрации и водонасыщение асфальтобетона колеблются в течение года: к началу осени они уменьшаются, к апрелю следующего года из-за ЦЗО достигают максимума, а затем из-за испарения воды понижаются, но остаются более высокими, чем в предыдущем году. Согласно [1], через 8-10 лет такой эволюции наступает массовое разрушение асфальтобетонных покрытий. На основании изучения повсеместных разрушений таких покрытий за весенне-зимние периоды в 2004-2005 гг. во Франции исследователи пришли к выводу [7], что суммарное ЦЗО за 12-15 лет может достигнуть 500-1200 циклов, после чего следует лавинное разрушение. Влияние ЦЗО на динамическую усталость подробно рассмотрено в [8].

В [9] показано, что даже после 200 циклов «сухого» изгиба битумных пленок на них образуются микротрещины, что свидетельствует о хрупкости асфальтобетона и создает благоприятные условия для разрушения асфальтобетонного покрытия в переходный период. К основным причинам ЦЗО авторы [4,7] относят чрезмерные усилия, действующие на структуру асфальтобетона при замерзании воды, а также гидравлические ударные давления весной при проезде транспорта. В [5] разрушение объясняется температурными микронапряжениями. В подтверждение этого приводятся данные сухого и водного ЦЗО (при температурах минус 20 °С и минус 40 °С на базе до 70 циклов), из которых следует, что в некоторых случаях «сухое» и водное ЦЗО сопоставимы по разрушающему действию.

Для оценки морозостойкости обычно используют коэффициенты, определяемые как соотношение показателей прочности асфальтобетонных образцов после и до ЦЗО, подобно тому, как это определяется для каменных материалов и цементобетонов. Требования к коэффициенту морозостойкости ($K_{МРЗ}$) асфальтобетона включены в стандарты Беларуси [10], России [11], Украины [12]. Как правило, они близки к нормируемым теми же стандартами требованиям по длительной водостойчивости.

В то же время пониженная морозостойкость асфальтобетона не может не отражаться на его деформационных характеристиках, она ухудшает несущую способность асфальтобетонного покрытия и всей

дорожной одежды в расчетный период. Уровень снижения можно определить только в случае оценки действия ЦЗО на значения самих деформационных характеристик. Результатам изучения влияния ЦЗО на значения реологических характеристик асфальтобетона посвящена настоящая публикация.

Принятые в различное время разными исследователями методики испытаний, как правило, не были унифицированы ни по времени, ни по температуре выдерживания объектов испытаний. В.А Головкин [5] проводил испытания в режиме замораживания – при минус 20 °С или минус 40 °С, с переменным временем замораживания-оттаивания и количеством ЦЗО до 70. Согласно стандарту Беларуси [10], насыщенные 5%-ным раствором поваренной соли образцы замораживают в течение 2,5 ч при температуре минус 18 °С, оттаивают в течение 2 ч в таком же растворе при температуре плюс 18 °С. После ЦЗО образцы испытывают на сжатие. ГОСТом 12801-98 [11] предусматривался 4-х часовой режим замораживания и оттаивания при температурах соответственно минус 18 °С и плюс 18 °С. Количество ЦЗО соответствовало ряду 5, 10, 15, 25, 50. Стандартом Украины [12] рекомендуется производить замораживание при температуре – минус 25 °С в течение 4 ч, а оттаивание – при плюс 20 °С в течение 4 ч. Минимальное количество ЦЗО – 25. Коэффициент морозостойкости определяется по соотношению показателей прочности на сжатие или на растяжение по образующей. Европейские нормы включают стандарт [13] на метод определения устойчивости асфальтобетона в противогололедных жидкостях. Данным документом не предлагается оценка такой устойчивости по соотношению показателей прочности. Ни один из перечисленных методов не позволяет раскрыть сущность изменений свойств асфальтобетона при ЦЗО. Они позволяют лишь констатировать результат этого воздействия.

Принципиально отличаются от этого методы испытания, приведенные в [4,14]. В них впервые приводятся значения $K_{МРЗ}$, полученные по соотношению модулей жесткости при изгибе [4] и при непрямом (по образующей) растяжении после ЦЗО [14]. Методика [14] отличается от традиционной тем, что цикл включает замораживание в течение 24 ч при температуре минус 18 °С, а затем те же 24 ч термостатирование при температуре 60 °С. После 10 циклов испытаний в таком режиме коэффициент морозо- и теплоустойчивости может достигать 0,3. Принятый в [14,15] режим представляется нецелесообразным, так как не отвечает условиям работы асфальтобетона в покрытии и совмещает два процесса – морозный и водный. При этом второй может полностью исказить эффект воздействия мороза, так как высокая температура приводит к резкому ухудшению адгезии и водостойкости асфальтобетона [16]. Несмотря на это, представленные в работе [14] результаты новы и оригинальны.

нальны. Кроме того, в ней высказано соображение, что европейский метод определения модуля упругости при непрямом растяжении может быть использован «как неразрушающий способ контроля, который позволяет проводить испытания на одном и том же образце до и после воздействия воды». Именно такой принцип изучения морозостойкости с использованием базового европейского стенда для определения модулей упругости при консольном изгибе [17] принят в настоящей работе.

Для определения модулей упругости при различных температурах и частотах использован вибростенд ХАДИ¹ [18]. Обязательным было условие определения модулей упругости в области линейного деформирования, ограниченной критическими напряжениями и деформациями, выше которых асфальтобетон переходит в зону нелинейного деформирования (рис. 1).

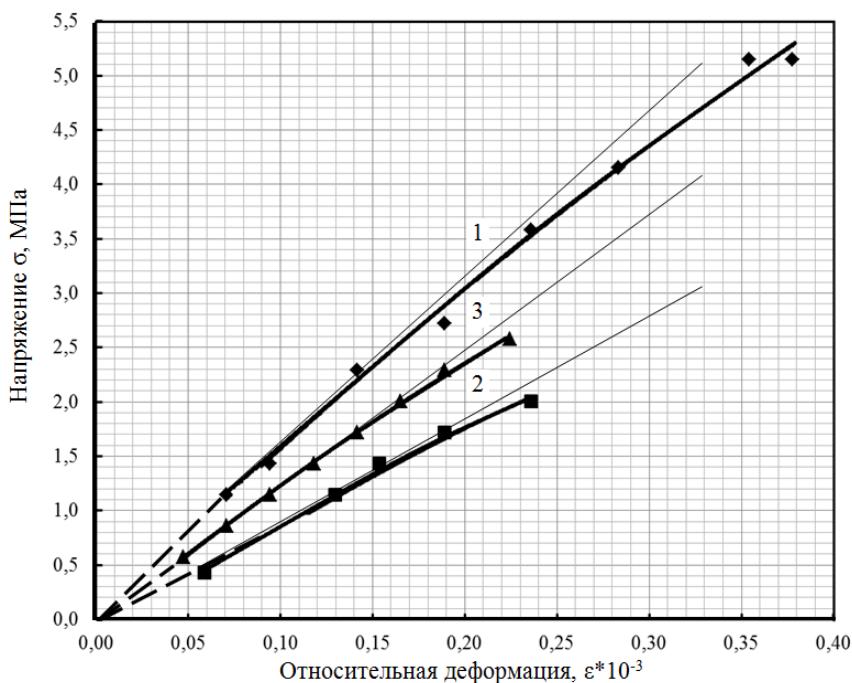


Рис. 1. Зависимости между деформациями и напряжениями асфальтобетона при частоте нагружения 0,5 Гц:

1 – До ЦЗО; 2 – После 50 ЦЗО;

3 – После 50 ЦЗО и отдыха при +21°C в течение 12 сут.

¹ Харьковский автомобильно-дорожный институт (ХАДИ) (1930-1993), Харьковский государственный автомобильно-дорожный технический университет (ХГАДТУ) (1993-2001), с 2001 Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет (ХНАДУ) – прим. ред.

Испытания на морозостойкость выполняли по следующей методике: асфальтобетонные образцы на 2-й день после изготовления насыщали водой под вакуумом (10-15 мм рт. ст.) при температуре 19-22 °С в течение 2-х ч, затем их погружали на 4 ч в предварительно охлажденную до минус 20±1 °С морозильную камеру, затем после извлечения из холодильной камеры выдерживали в воде при температуре 19-21 °С в течение 4-х ч, затем их снова замораживали 4 ч. На ночь с 20 ч до 8 ч (12 ч) образцы оставляли в воде при температуре 19-21 °С. В случае испытаний по восстановлению свойств образцы выдерживали необходимое время при температуре 21 °С и 30 °С на воздухе.

В виду практической неизученности зависимости модулей упругости от ЦЗО и с целью повышения точности определения изменений для исследований был принят наиболее однородный по составу песчаный асфальтобетон типа «Г», составленный из отдельных фракций с тем, чтобы обеспечить срединное между крайними пределами кривых плотных смесей расположение гранулометрической кривой. Содержание зерен минерального порошка мельче 0,071 мм составляло 11%; содержание битума марки БНД 60/90 – 6%, со следующими показателями свойств: пенетрация при 25 °С – 82 х 0,1 мм; температура размягчения – 50,5 °С; температура хрупкости – минус 17 °С; растяжимость при 25 °С – 94 см.

Выполнение полного цикла испытаний сопряжено со многими техническими трудностями. В связи с этим во время вынужденных перерывов ЦЗО образцы-балки выдерживали в водной среде при температуре плюс 21 °С.

Типичные зависимости «напряжение – относительная деформация», приведенные на **рис. 1**, показывают, что при одинаковой деформации (близкой к возникающей на дороге – $0,2 \times 10^{-3}$) величина критического напряжения до ЦЗО существенно выше (в 1,76 раза), чем после 50 ЦЗО. Это означает переход покрытия в состояние, когда его несущая способность соответственно падает, а транспортные нагрузки могут вызывать перенапряжения, превышающие границы линейности.

Полученные при соблюдении таких условий частотные зависимости модулей упругости в диапазоне частот нагружения от 0,01 Гц до 10 Гц (три частотных порядка) и при всех температурах (минус 10 °С, 0 °С, 20 °С, 35 °С) близки к степенным [18]. При низких температурах и высокой частоте модуль упругости достигает 24000 МПа, что отвечает уровню цементобетона марки 300. При высокой температуре (35 °С) и низкой частоте (0,01 Гц) модуль снижается до 400 МПа (в 6 раз). Температурные зависимости модулей упругости, установленные при раз-

ных частотах свидетельствуют о постоянном, в процессе службы в дорожной одежде, переходе асфальтобетона из вязко-пластичного в вязко-упругое, а затем в хрупкое состояние. Естественно, что даже при температурах ниже 0 °С асфальтобетон практически всегда близок к хрупкому телу. Именно это хрупкое тело подвергается циклическим напряжениям и деформациям с одновременным воздействием охлаждающейся и переходящей в лед воды, что в результате приводит к снижению прочности и модулей упругости асфальтобетона.

Приведенные в **табл. 1** данные относятся к испытаниям различным образом подготовленных балок. Одна из них подвергалась ЦЗО через сутки после изготовления, другая была предварительно выдержана 90 сут. при температуре 21 °С. Известно, что процесс структурообразования в асфальтобетоне продолжается после изготовления и завершается через 25-35 сут. [17]. Это подтверждается приведенными в **табл. 1** результатами. При всех частотах и температурах испытания предварительное выдерживание образцов способствовало более высокой устойчивости при ЦЗО. Это первое обстоятельство, которое позволяет усомниться в правильности методической подготовки образцов при определении других показателей механических свойств.

Данные **табл. 1** раскрывают такие особенности реакции $K_{МРЗ}$ на условия испытания, о которых до настоящего времени не было никаких сведений. Значения $K_{МРЗ}$ при всех температурах растут с увеличением частоты испытания. Это подобно росту с увеличением скорости испытания значений модулей упругости и пределов прочности, согласно данным Н.Н. Иванова и А.В. Руденского [19]. Можно предполагать, что с ростом частоты деформирования ослабляющее влияние крупных дефектов структуры не успевают сказаться на значениях модулей упругости, подобно тому, как при высокоскоростном деформировании длинновременные релаксационные процессы не успевают произойти.

В связи с этим, принимая во внимание принцип температурно-временной суперпозиции вязкоупругих систем, можно понять и возрастание значений $K_{МРЗ}$ с понижением температуры при всех частотах нагружения. В результате наименьшими по своей величине являются $K_{МРЗ}$, определенные при повышенных температурах и низкой частоте, а наибольшими – при низкой температуре и высокой частоте. В первом случае асфальтобетон является вязкоупругим телом, во втором – хрупким. Возникает вопрос, какое сочетание времени (частот) и температуры испытания является более объективным? Вероятно, это сочетание должно приниматься в соответствии с климатическими условиями работы асфальтобетона.

Таблица 1

*Зависимость коэффициентов морозостойкости асфальтобетона
от температуры и частоты*

<i>Частота, Гц</i>	<i>Коэффициенты морозостойкости при температурах, °С</i>				
	35	20	15	0	-10
<i>0,01</i>	0,63 —	0,53 0,27	0,53 0,35	0,63 0,63	0,85 0,91
<i>0,1</i>	—	0,54 0,33	0,56 0,30	0,78 —	—
<i>0,5</i>	—	0,58 0,33	0,63 0,40	0,85 —	—
<i>1,0</i>	—	0,61 0,38	0,63 0,45	0,63 0,71	—
<i>5,0</i>	0,85 —	0,64 0,38	0,77 0,44	—	1,0 0,95

Примечания:

- 1. Испытания проводились на образцах асфальтобетона после 21 ЦЗО, 17 сут. выдерживания в воде и 29 ЦЗО.*
- 2. В числителе – для балки, выдержанной 90 сут. при температуре +21°С перед ЦЗО; в знаменателе – для балки, сформованной перед ЦЗО.*

Если принять за аксиому, что морозостойкость характеризует способность сохранять неповреждаемость слоя асфальтобетона в покрытии, а трещиностойкость сохранять сплошность покрытия по его длине, то необходимо признать, что механизмы этих процессов существенно различаются. В первом случае преобладают различные микроструктурные разрушения под влиянием водно-морозных факторов. Во втором решающую роль играют поперечные трещины, вызванные возникновением в покрытии напряжений, больших, чем прочность асфальтобетона, или недостаточная деформативность асфальтобетона, меньшая, чем величина деформаций, вызванных температурным линейным сокращением вдоль полосы покрытия.

Разные механизмы этих разрушений могут привести к различным последствиям в их последующем жизненном цикле. Температурные усадочные трещины, как правило, не восстанавливаются и могут быть только на время устранены путем герметизации. Дефекты, вызванные ЦЗО, вероятно, могут «залечиваться» под влиянием температу-

ры окружающей среды и уплотняющего воздействия пневмошин. На полосе наката, как правило, шелушение и выкрашивание отсутствуют, выбоины образуются редко.

Для проверки этих предпосылок были проведены опыты по прогреву асфальтобетона, предварительно подверженного 50 ЦЗО в течение 12 сут. при температуре 21 °С, а затем 10 сут. при 30 °С. Полученные результаты (**табл. 2**) свидетельствуют о существенном увеличении, особенно на первом этапе, модулей: при температуре 20 °С – 27-28%; при температуре 30 °С – до 40%. Дополнительное выдерживание при 30 °С приводит к понижению величины прироста, тем меньшему, чем ниже температура и частота испытания.

Эти данные свидетельствуют о новом факте, на котором многие исследователи настаивали, а некоторые, в том числе и один из авторов этой работы, отрицали [20]. Таким образом, можно утверждать, что дефекты, порожденные ЦЗО, могут залечиваться, и следует искать пути активации этого процесса. В пользу предполагаемых процессов разрушения и восстановления свидетельствует увеличение величины критического напряжения при относительной деформации $2 \cdot 10^{-4}$, показанное на **рис. 1**. Естественно, было бы полезным подтвердить наблюдаемые процессы физико-химическими методами. Ультразвуковые исследования могут оказаться недостаточно чувствительными к этим процессам, а при помощи сканирующей гамма-денситометрии и электроденситометрии, как следует из работ французских исследователей, вероятно можно обнаружить внутренние дефекты [21].

Выявленные в ходе исследований закономерности и систематические контрольные замеры воспроизводства исходных данных дают основание предположить, что метод линейного деформирования может быть принят в качестве неразрушающего метода оценки морозостойкости асфальтобетона. В общих чертах он сводится к следующему. Сформированные образцы следует выдержать при температуре 18-22 °С в течение 30 сут., затем определить их модули упругости при температурах 0 °С, 10 °С, 20 °С. Как показали результаты исследования, использовать более высокие температуры нецелесообразно, так как в ходе испытаний продолжительностью 4-8 ч возможно самозалечивание дефектов. Затем образцы подвергают необходимым для данного климатического района количеству/этапам ЦЗО. После каждого этапа определяют модуль упругости, а с учетом известного модуля упругости не подверженного ЦЗО образца определяют соответствующие $K_{МРЗ}$. Достоинством предлагаемого метода является повышенная достоверность испытаний, так как исключается использование результатов испытания различных образцов, которые могут быть неоднородны. Сокращается также количество испытываемых образцов.

Таблица 2

*Результаты испытаний асфальтобетона на морозостойкость –
влияние продолжительности периодов отдыха*

Температура, °С	Частота, Гц	Рост коэффициентов морозостойкости после отдыха			
		Модуль упругости до ЦЗО, МПа	$K_{мрз}$ после 50 ЦЗО	$K_{мрз}$ после отдыха в течение 12 сут. (21 °С)	$K_{мрз}$ после отдыха в течение 12 сут. (21 °С) и 10 сут. (30 °С)
20	0,01	2344	0,27	0,56	0,78
	0,1	3467	0,33	0,61	0,79
	0,5	4786	0,33	0,62	0,78
	1,0	5248	0,38	0,67	0,76
	5,0	6918	0,38	0,65	0,72
15	0,01	3019	0,35	0,66	0,74
	0,1	6025	0,30	0,52	0,62
	0,5	6310	0,40	0,60	0,72
	1,0	6920	0,45	0,72	0,76
0	0,01	6606	0,63	1,0	0,98
	0,1	9332	0,68	1,0	0,98
	0,5	11430	0,69	1,0	0,98
	1,0	13180	0,68	1,09	0,92
	5,0	14790	0,71	1,12	0,83

Сложный характер изменения модулей упругости на раннем этапе испытания иллюстрируется данными, приведенными в **табл. 3**. Балка была испытана на шестые сутки после изготовления. После 32 сут. выдерживания на воздухе при температуре 20 °С значения модулей упругости возросли в 1,5 раза. При температуре испытания 10 °С превышение значений модуля составляет около 1,3 раза. Это же превышение при температурах 0 °С и минус 10 °С уменьшилось до 1,1-1,2 раза. Дополнительные 18 сут. выдерживания при температуре 20 °С практически не изменили значения модулей упругости. Десять циклов замораживания-оттаивания привели к понижению значений модулей упругости и снижению $K_{мрз}$ при температурах: 20 °С до 0,78-0,97; 10 °С – 0,82-1,03, 0 °С – 0,74-0,92; минус 10 °С – 0,83-1,0.

Как и в предыдущих случаях, значения $K_{мрз}$ росли с частотой и понижением температуры. Этот пример показывает, что на одном объ-

екте может прослеживаться процесс повышения модуля на стадии подготовки и его уменьшения после циклического замораживания-оттаивания.

Таблица 3

Влияние режима ЦЗО и отдыха на показатели морозостойкости асфальтобетона

Температура, °С	Частота, Гц	Комплексные модули упругости $E^* \times 10^3$, МПа					Соотношение модулей и коэффициентов морозостойкости		
		Режим испытания							
		После ЦЗО (6 сут.)	Отдых (32 ч)	Отдых (50 ч)	10 ЦЗО	50 ЦЗО	E_3/E_1	$K_{MP3} E_4/E_3$	$K_{MP3} E_5/E_3$
		E_1	E_2	E_3	E_4	E_5			
20	0,01	1,03	1,56	1,55	1,21	1,13	1,51	0,78	0,73
	0,5	2,13	3,34	3,87	3,38	3,38	1,80	0,87	0,87
	10	3,5	5,43	5,57	5,43	5,43	1,59	0,97	0,97
10	0,01	3,1	4,06	3,53	2,89	2,70	1,31	0,82	0,76
	0,5	6,0	7,67	6,8	6,79	6,79	1,28	1,00	0,99
	10	7,99	9,60	9,63	10,05	8,51	1,20	1,03	0,88
0	0,01	6,54	8,72	8,82	6,55	7,25	1,33	0,75	0,82
	0,5	11,05	14,75	13,6	10,88	10,9	1,33	0,82	0,80
	10	11,68	15,88	14,80	13,7	13,6	1,36	0,92	0,91
-10	0,01	12,16	13,27	12,50	10,41	10,15	1,09	0,83	0,81
	0,5	16,34	17,70	16,34	16,34	15,64	1,08	1,00	0,96
	10	17,47	21,80	20,33	18,31	17,45	1,16	0,90	0,86

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Процесс структурообразования асфальтобетона во времени продолжается не менее 30 сут. Это необходимо учитывать при разработке испытания на МРЗ. Устройство покрытий целесообразно ограничивать температурой окружающего воздуха и сезоном (весной не ниже 5 °С, осенью не ниже 10 °С) подобно устройству слоя из холодных асфальтобетонных смесей.

2. Коэффициент МРЗ растет с понижением температуры и с повышением частоты испытаний аналогично релаксационному влиянию на прочность и модули упругости асфальтобетона. В связи с этим возникает острый вопрос о выборе режимов испытаний, определяющих его реологическое состояние.
3. Морозостойкость восстанавливается после выдерживания асфальтобетона при положительных температурах: восстановление значительнее после выдерживания при более высоких температурах.
4. Метод линейного вязкоупругого деформирования можно использовать в качестве неразрушающего способа структурообразования и разрушения асфальтобетона после циклического замораживания-оттаивания.

ЛИТЕРАТУРА

1. Распопов Н.М. Исследование морозоустойчивости асфальтобетонного покрытия / Н.М. Распопов // Труды ДорНИИ. – М.: Дориздат, 1949. – С.134-158.
2. Кононов В.Н. Причины преждевременных разрушений асфальтобетонных покрытий / В.Н. Кононов // Автомобильные дороги. – 1967. – № 9. – С. 24-25.
3. Баранковский А.С. Морозостойкость асфальтобетонов дорожных покрытий в районах с суровыми климатическими условиями: автореф. дис. ... канд. техн. – Харьков, 1980. – 24 с.
4. Гегелия Д.И. Закономерности изменения некоторых расчетных параметров асфальтобетона при длительном воздействии воды и знакопеременных температур / Д.И. Гегелия // Труды СоюздорНИИ: Совершенствование технологии строительства асфальтобетонных и других черных покрытий / М.: СоюздорНИИ, 1981. – С. 67-76.
5. Головкич В.А. Фізична суть морозостійкості дорожніх асфальтобетонів / В.А. Головкич // Автомобільні дороги і дорожнє будівництво. – Київ: Будівельник, 1983. – Вип.32. – С. 46-54.
6. Цитович Н.А. Механика мерзлых грунтов: учебное пособие / Цитович Н.А. – М.: Высшая школа, 1978. – 446 с.
7. Mauduit V. Dégradation précoce des couches de roulement bitumineuses à la sortie des hivers / V. Mauduit, C. Mauduit, N. Vulcano-Greullet, N. Coulon // RGRA. – 2007. – № 859. – P. 99-104.
8. Руденский А.В. Усталость асфальтобетона в условиях видах водонасыщения и циклического замораживания / А.В. Руденский,

- Д.И. Гегелия, Т.Н. Калашикова, А.Л. Штромберг // Труды ГипродорНИИ. – 1979. – Вып. 24. – С. 131-138.
9. Гохман Л.М. Хрупкость органических вяжущих после многократного растяжения при отрицательных температурах / Л.М. Гохман, С.Н. Гершкохен : Автомоб. дороги: информ. сб. – М.: Информавтодор, 1997. – Вып. 10. – С. 1-18.
 10. СТБ 1115-2004. Смеси асфальтобетонные дорожные, аэродромные и асфальтобетон. Методы испытания. – Электрон. дан. – URL: https://www.google.ru/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=3&ved=0ahUKEwiL5un-wvHTAhVDhiwKHYZRDkkQFgg7MAI&url=http%3A%2F%2Fgost-snip.su%2Fdownload%2Fstb_1115_2004_smesi_asfaltobetonnie_dorojnie_aerodromnie_i_asfaltobeto&usq=AFQjCNGH5kUvrQR5NZjGRqedeOGP9S8VLg&cad=rjt (дата обращения: 15.05.2017).
 11. ГОСТ 12801-98. Материалы на основе органических вяжущих для дорожного и аэродромного строительства. Методы испытаний. – М.: ГУП ЦПП, 1999. – 54 с.
 12. СОУ 42.1-37641.918 – 110:2014. Метод визначення показника морозостійкості.
 13. EN 12697-41. Mélanges bitumineux. Méthodes d'essai pour mélange hydrocarboné à chaud. – Partie 41: Résistance aux fluides de déverglaçage.
 14. Пахаренко Д.В. Сравнительные испытания асфальтобетонов с различными модификаторами / Д.В. Пахаренко, Д.А. Колесник // Дороги. Инновации в строительстве.– 2016. – № 52. – С.66-70.
 15. Liang R.Y. Refine AASHTO T283 Resistance of Compacted Bituminous Mixture to Moisture Induced Damage for Superpave // FHWA/OH-2008/1. – 2008. – 213 p. – Электрон. дан. – URL: <https://ntl.bts.gov/lib/55000/55800/55840/FHWA-OH-2008-1.PDF> (дата обращения: 15.05.2017).
 16. Золотарев В.А. Особенности экспресс-метода оценки определения водостойчивости асфальтобетона / В.А. Золотарев, Е.Н. Агеева, С.В. Ефремов // Дорожные асфальтобетоны. Избранные труды. – СПб.: Славутич, 2015. – Т. 3. – С. 158-161.
 17. EN 12697-26. Mélanges bitumineux – Méthode d'essai pour mélange hydrocarboné à chaud. Partie 26. Module.
 18. Золотарев В.А. Долговечность дорожных асфальтобетонов / В.А. Золотарев. – Харьков: Вища школа, 1977. – 116 с.
 19. Иванов Н.Н. Определение требуемой прочности асфальтобетона с учетом его пластичности и конкретных условий работы покрытий / Н.Н. Иванов, А.В. Руденский // Труды СоюздорНИИ.

– 1967. – № 11. – С. 41-49.

20. Золотарев В.А. *Натурные наблюдения свидетельствуют: трещины в дорожных одеждах не залечиваются* / В.А. Золотарев, А.В. Космин, Я.И. Пыриг // *Транспортное строительство*. – 2007. – №3. – С. 15-18.
21. Feeser A. *Enrobés bitumineux. Caractérisation de la masse volumique apparante* / A. Feeser, B. Bolot, D. Edel, L. Germain, S. Goussas // *RGRA*. – № 941. – 2016. – P. 64-71.

L I T E R A T U R A

1. Raspopov N.M. *Issledovanie morozoustojchivosti asfal'tobetonogo pokrytija* / N.M. Raspopov // *Trudy DorNII*. – M.: Dorizdat, 1949. – S.134-158.
2. Kononov V.N. *Prichiny prezhdvremennyh razrushenij asfal'tobetonnyh pokrytij* / V.N. Kononov // *Avtomobil'nye dorogi*. – 1967. – # 9. – S. 24-25.
3. Barankovskij A.S. *Morozostojkost' asfal'tobetonov dorozhnyh pokrytij v rajonah s surovymi klimaticheskimi uslovijami: avtoref. dis. ... kand. tehn.* – Har'kov, 1980. – 24 s.
4. Gegelija D.I. *Zakonomernosti izmenenija nekotoryh raschetnyh parametrov asfal'tobetona pri dlitel'nom vozdejstvii vody i znakoperelomnyh temperatur* / D.I. Gegelija // *Trudy SojuzdorNII: Sovershenstvovanie tehnologii stroitel'stva asfal'tobetonnyh i drugih chernyh pokrytij* / M.: SojuzdorNII, 1981. – S. 67-76.
5. Golovko V.A. *Fizichna sut' morozostojkosti dorozhnyh asfal'tobetoniv* / V.A. Golovko // *Avtomobil'ni dorogi i dorozhne budivnictvo*. – Kii'v: *Budivel'nik*, 1983. – Vip.32. – S. 46-54.
6. Citovich N.A. *Mehanika merzlyh gruntov: uchebnoe posobie* / Citovich N.A. – M.: *Vysshaja shkola*, 1978. – 446 s.
7. Mauduit V. *Dégradation précoce des couches de roulement bitumineuses à la sortie des hivers* / V. Mauduit, C. Mauduit, N. Vulcano-Greullet, N. Coulon // *RGRA*. – 2007.– # 859. – P. 99-104.
8. Rudenskij A.V. *Ustalost' asfal'tobetona v uslovijah vidah vodonasyshhenija i ciklicheskogo zamorazhivaniija* / A.V. Rudenskij, D.I. Gegelija, T.N. Kalashnikova, A.L. Shtromberg // *Trudy GiprodorNII*. – 1979. – Vyp. 24. – S. 131-138.
9. Gohman L.M. *Hrupkost' organicheskikh vjazzhushhih posle mnogokratnogo rastjazhenija pri otricatel'nyh temperaturah* / L.M. Gohman, S.N. Gershkohen : *Avtomob. dorogi: inform. sb.* – M.: *Informavtodor*, 1997. – Vyp. 10. – S. 1-18.
10. *STB 1115-2004. Smesi asfal'tobetonnye dorozhnye, ajerodromnye i asfal'tobeton. Metody ispytaniija.* – *Jelektron. dan.* – URL:

- https://www.google.ru/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=3&ved=0ahUKEwiL5un-wvHTAhVDhiwKHYZRDkkQFgg7MAI&url=http%3A%2F%2Fgost-snip.su%2Fdownload%2Fstb_1115_2004_smesi_asfaltobetonnie_dorojnie_aerodromnie_i_asfaltobeto&usg=AFQjCNGH5kUvrQR5NZjGRqedeOGP9S8VLg&cad=rjt (data obrashhenija: 15.05.2017).
11. GOST 12801-98. *Materialy na osnove organicheskikh vjazhushchih dlja dorozhnogo i ajerodromnogo stroitel'stva. Metody ispytanij.* – M.: GUP CPP, 1999. – 54 s.
 12. SOU 42.1-37641.918 – 110:2014. *Metod viznachennja pokaznika morozostijkosti.*
 13. EN 12697-41. *Mélanges bitumineux. Méthodes d'essai pour mélange hydrocarboné à chaud. – Partie 41: Résistance aux fluides de déverglaçage.*
 14. Paharenko D.V. *Sravnitel'nye ispytaniya asfal'tobetonov s razlichnymi modifikatorami / D.V. Paharenko, D.A. Kolesnik // Dorogi. Innovacii v stroitel'stve.* – 2016. – # 52. – S.66-70.
 15. Liang R.Y. *Refine AASHTO T283 Resistance of Compacted Bituminous Mixture to Moisture Induced Damage for Superpave // FHWA/OH-2008/1.* – 2008. – 213 p. – *Jelektron. dan.* – URL: <https://ntl.bts.gov/lib/55000/55800/55840/FHWA-OH-2008-1.PDF> (data obrashhenija: 15.05.2017).
 16. Zolotarev V.A. *Osobennosti jekspress-metoda ocenki opredelenija vodoustojchivosti asfal'tobetona / V.A. Zolotarev, E.N. Ageeva, S.V. Efremov // Dorozhnye asfal'tobetony. Izbrannye trudy.* – SPb.: Slavutich, 2015. – T. 3. – S. 158-161.
 17. EN 12697-26. *Mélanges bitumineux – Méthode d'essai pour mélange hydrocarboné à chaud. Partie 26. Module.*
 18. Zolotarev V.A. *Dolgovechnost' dorozhnyh asfal'tobetonov / V.A. Zolotarev.* – Har'kov: Vishha shkola, 1977. – 116 s.
 19. Ivanov N.N. *Opredelenie trebuemoj prochnosti asfal'tobetona s uchetom ego plastichnosti i konkretnyh uslovij raboty pokrytij / N.N. Ivanov, A.V. Rudenskij // Trudy SojuzdorNII.* – 1967. – # 11. – S. 41-49.
 20. Zolotarev V.A. *Naturnye nabljudenija svidetel'stvujut: treshhiny v dorozhnyh odezhдах ne zalechivajutsja / V.A. Zolotarev, A.V. Kosmin, Ja.I. Pyrig // Transportnoe stroitel'stvo.* – 2007. – #3. – S. 15-18.
 21. Feeser A. *Enrobés bitumineux. Caractérisation de la masse volumique apparante / A. Feeser, B. Bolot, D. Edel, L. Germain, S. Goussas // RGRA.* – # 941. – 2016. – P. 64-71.

**INFLUENCE OF FREEZE-THAW CYCLING ON
ASPHALT CONCRETE ELASTIC MODULUS**

*Doctor of Engineering, Professor V.A. Zolotarev,
Postgraduate Student Ya.V. Ilyin
(Kharkiv National Automobile
and Highway University)*

*Contact information: vvm@khadi.kharkov.ua;
ya_ilin@mail.ru;
yail-in12011993@gmail.com*

This article concerns the influence of freeze-thaw cycling and subsequent rest on elastic modulus changes of asphalt concrete. It is shown the dependence of frost resistance coefficient from test time-temperature conditions. It is revealed an effect of modulus partial return to the initial value.

It is suggested the use of linear viscoelastic straining as a nondestructive method for determining frost resistance of asphalt concrete.

Keywords: *asphalt concrete, frost resistance, linear viscoelasticity, elastic modulus, heat recovery.*

Рецензент: канд. техн. наук С.В. Полякова (ФАУ «РОСДОРНИИ»).

Статья поступила в редакцию: 06.03.2017 г.