

## ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ СВЯЗЕЙ ПРИ АНАЛИЗЕ ОПАСНОСТИ ПРОГРЕССИРУЮЩЕГО ОБРУШЕНИЯ

*П. А. Кореньков, В. В. Герман*

**Кореньков Павел Анатольевич**, кандидат технических наук, доцент, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, г. Москва, Российская Федерация, тел.: +7 (495) 287-49-14 (доб. 1747); e-mail: kpa\_gbk@mail.ru;

**Герман Владислав Вадимович**, студент, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, г. Москва, Российская Федерация, тел.: +7 (919) 720-15-44; e-mail: vladislav.german@mail.ru

Приведены результаты численного моделирования конструкций многоэтажного железобетонного каркаса при аварийных и эксплуатационных нагрузках. При этом рассмотрено два варианта армирования конструкции: без дополнительного армирования, второй – с введением в узловые зоны дополнительной канатной арматурой. Построение расчетной модели выполнено с учетом физической и геометрической нелинейности. Анализ результатов показал, что путем введения дополнительного армирования можно добиться снижения деформативности ригелей до 23 %. Дополнительное армирование снижает концентрацию напряжений в узловых зонах и способствует перераспределению усилий в элементах несущей системы, сопротивляясь явлениям прогрессирующего обрушения. Предложенные конструктивные мероприятия могут найти практическое применение в проектировании и строительстве подобных конструкций, способствуя повышению их безопасности и живучести.

**Ключевые слова:** дополнительные связи, прогрессирующее обрушение, здание, железобетонный каркас, армирование.

## ASSESSMENT OF THE INFLUENCE OF ADDITIONAL CONNECTIONS IN THE ANALYSIS OF THE DANGER OF PROGRESSIVE COLLAPSE

*P. A. Korenkov, V. V. German*

**Korenkov Pavel Anatolyevich**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, National Research University Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russian Federation, phone: +7 (495) 287-49-14 (add. 1747); e-mail: kpa\_gbk@mail.ru;

**German Vladislav Vadimovich**, student, National Research University Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russian Federation, phone: +7 (919) 720-15-44; e-mail: vladislav.german@mail.ru

The results of numerical modeling of the structure under accidental impacts and operational loads are presented. Two ways of reinforcement were considered: the first – a reinforced concrete frame without additional connections, and the second – a reinforced concrete frame with additional connections. The numerical model was created taking into account the nonlinear law of deformation. The analysis of the results shows that when additional reinforcement is included, it is possible to reduce the deformations of the beams by up to 23 % in the event of an accident. Additional reinforcement also decreases stress concentration in nodal zones and promotes the redistribution of forces within the structural elements of the load-bearing system, resisting the progressive collapse. This makes the frame structure more resistant to emergency situations. The proposed structural measures can find practical application in the design and construction of such structures, contributing to the improvement of their safety and survivability.

**Keywords:** additional connections, progressive collapse, building, reinforced concrete frame, reinforcement.

### Введение

Расчеты конструкций с рамным каркасом на устойчивость к прогрессирующему обрушению все чаще начинают использоваться в инженерной практике [1, 2]. Рассматриваемой тематике уделяется значительное внимание как среди отечественных [3–13], так и зарубежных исследователей [14–17]. Прогрессирующее обрушение стало одной из основных задач, методы по борьбе с которой решаются на законодательном уровне [3].

Одним из подходов минимизации обрушений является установка дополнительного армирования [7, 8]. Предлагаемое решение представляет собой усиление конструкции путем введения дополнительных элементов армирования, которые способны включаться в работу после

аварийного воздействия и предотвращать его распространение на остальные элементы несущей системы [9].

Используемые конструктивные мероприятия должны быть технологичны к реализации в условиях строительной площадки, а также способствовать реализации пластических деформаций. Все это обеспечит большее распределение внутренних усилий [8]. Рассмотрим дополнительное армирование канатной арматурой с выгибом у стыка ригеля и колонны. Выгиб дополнительной арматуры обусловлен тем, что он будет включен в работу только при аварийном воздействии. Принципиальная схема деформирования узла показана на рисунке 1.

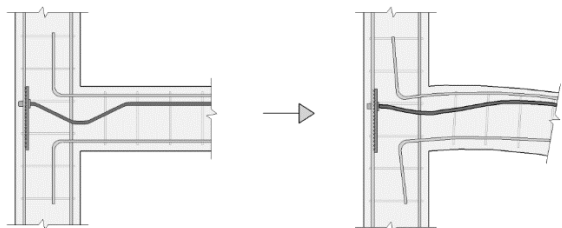


Рис. 1. Работа узла рамного железобетонного каркаса с дополнительным армированием

Цель настоящей работы – оценка эффективности предлагаемых конструктивных мероприятий

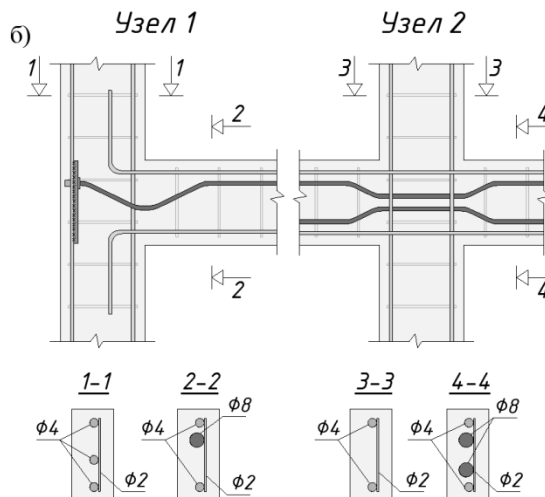
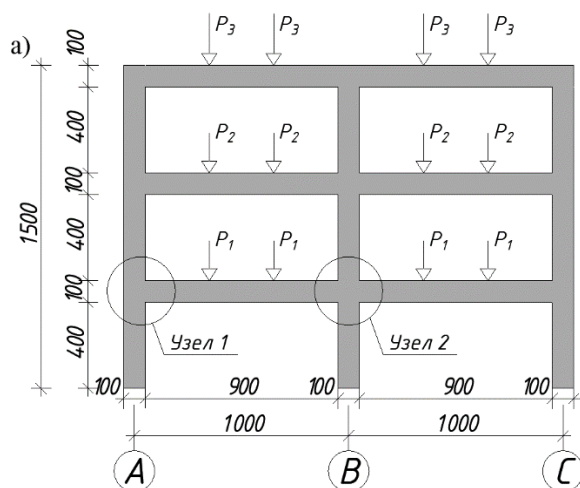


Рис. 2. Схемы:

а) расчетная схема рамного каркаса; б) конструктивное решение узлов

В ходе численного эксперимента было рассмотрено два варианта конструктивного исполнения: без дополнительного армирования и с введением в узлы канатного армирования, включающегося в работу при аварийном воздействии.

Рамный железобетонный каркас изготовлен из бетона класса В40. Армирование представлено плоскими каркасами с продольной арматурой диаметром 8 мм класса А500 и поперечной – 2 мм того же класса. Помимо этого, есть дополнительное армирование, которое представлено канатной арматурой 12 мм класса А500.

Характеристики бетона и арматуры заданы исходя из закона нелинейного деформирования (рис. 3).

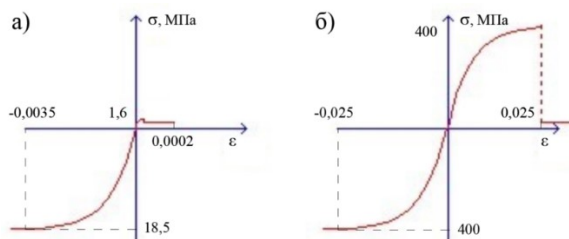


Рис. 3. Графики экспоненциального закона деформирования: а) бетона; б) арматуры

на параметры напряженно-деформированного состояния как в эксплуатационной стадии, так и при аварийном воздействии, вызванном выключением из работы центральной колонны первого этажа.

### Методы

Оценка влияния дополнительных связей в узлах сопряжения конструктивных элементов использована численная модель рамного железобетонного каркаса. Габариты рамного каркаса и конструктивные решения узлов представлены на рисунке 2.

Нагрузка, представленная в виде сосредоточенных сил, расположена на 1/3 от пролета конструкции. Значение сосредоточенных сил в конструкции равны:  $P_1 = 2,47$  кН,  $P_2 = 2$  кН,  $P_3 = 1,44$  кН. Трехмерная модель узловых соединений представлена на рисунке 4.

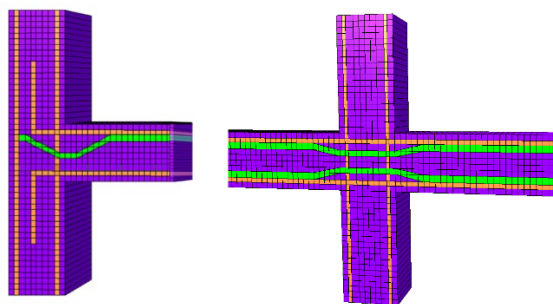


Рис. 4. Общий вид моделей узлов

При исследуемом локальном разрушении был рассмотрен возможный механизм прогрессирующего обрушения, характеризующийся одновременным поступательным смещением вниз всех вертикальных конструкций (или отдельных их частей) [11].

### Результаты и обсуждения

В ходе расчетного анализа был выявлен характер влияния дополнительного армирования на конструкцию в стадии эксплуатации и при

аварийном воздействии. Установлено, что при добавлении в конструкцию дополнительного армирования происходит перераспределение

внутренних усилий во всех элементах конструктивной системы. Максимальные сжимающие и растягивающие напряжения (рис. 5) уменьшились до 9 %.

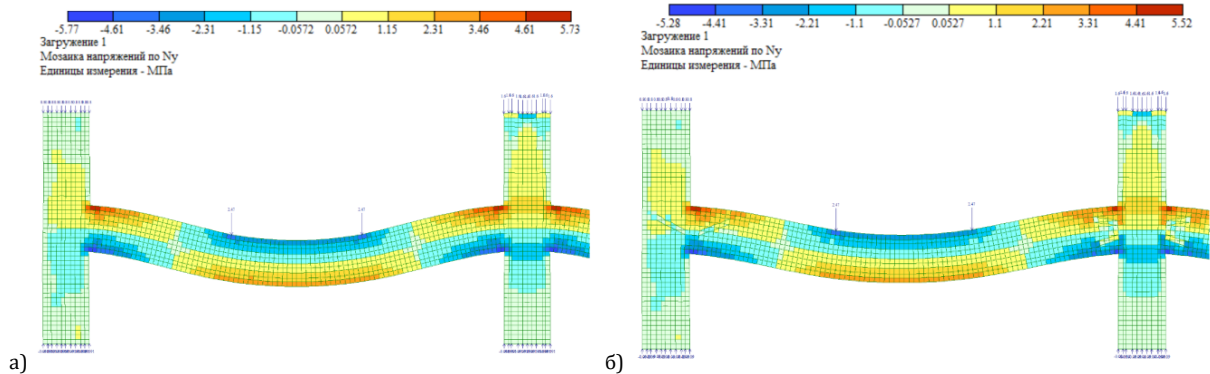


Рис. 5. Мозаика напряжений в стадии эксплуатации:  
а) без дополнительного армирования, б) с дополнительным армированием

Вертикальные перемещения в стадии эксплуатации уменьшились на 11 %, принимая во внимание, что дополнительное армирование расположено в сжатой зоне припорной части ригелей

и перераспределяет на себя часть сжимающих усилий в рассматриваемых сечениях (рис. 6).

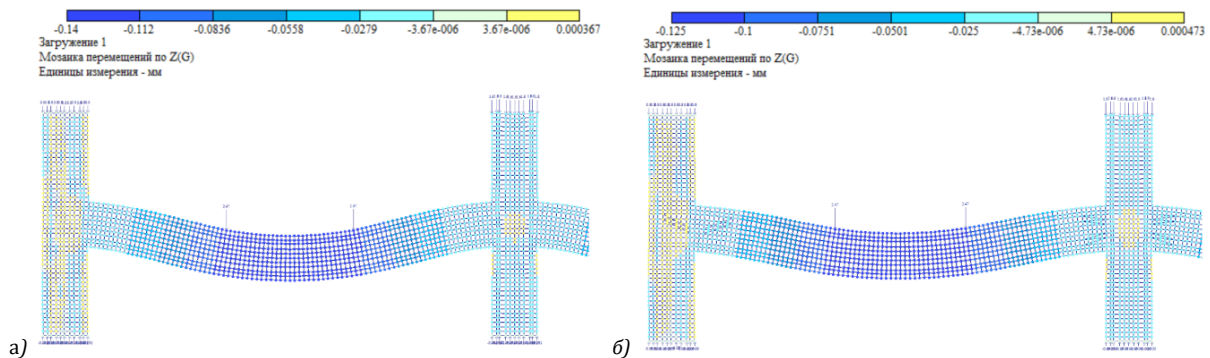


Рис. 6. Мозаика перемещений в стадии эксплуатации:  
а) без дополнительного армирования, б) с дополнительным армированием

В процессе внезапного удаления несущей колонны под действием аварийной нагрузки происходит догружение оставшихся неразрушенных элементов [2, 5, 10]. При анализе конструкции в аварийном состоянии установлено, что сжимающие напряжения уменьшились на 9 %, а растягивающие увеличились на 16 %. Обращает на себя

внимание плавное изменение напряжений вдоль продольной оси ригеля, чего не наблюдается в конструкции без дополнительного армирования. В крайних колоннах сжимающие напряжения уменьшились на 20 % (рис. 7).

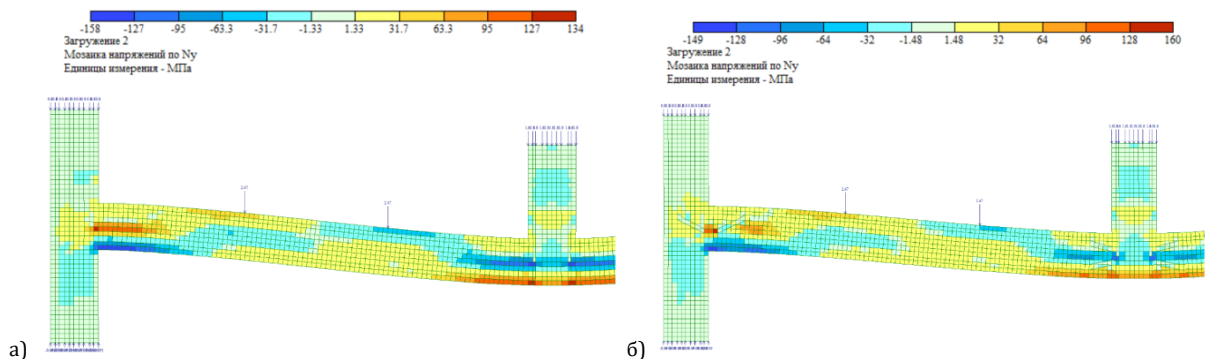


Рис. 7. Мозаика напряжений при аварийном воздействии:  
а) без дополнительного армирования, б) с дополнительным армированием

Анализируя характер деформированной схемы после аварийного воздействия, выявлено значительное снижение перемещений под удален-

ной средней опорой (до 23 %). Качественный характер перемещений аналогичен рассмотренным ранее (рис. 6).

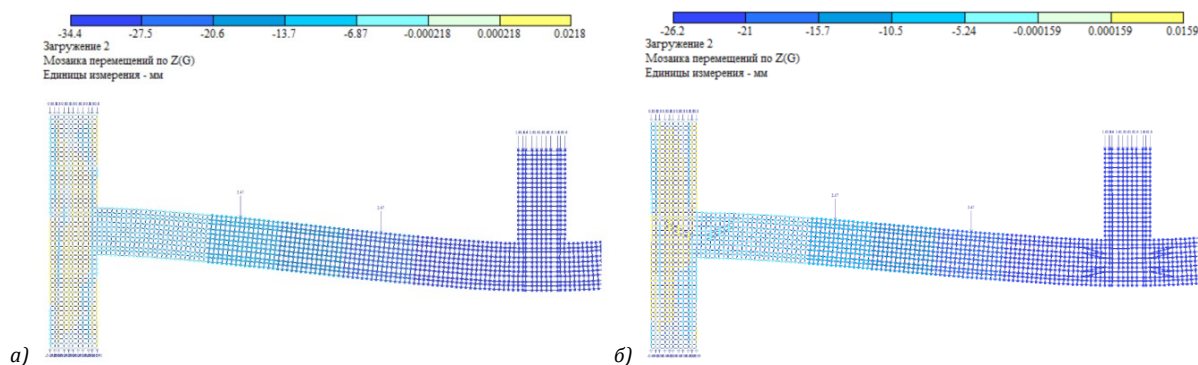


Рис. 8. Мозаика перемещений при аварийном воздействии:  
а) без дополнительного армирования, б) с дополнительным армированием

Максимальные сжимающие напряжения в стадии эксплуатации в наиболее опасных сечениях конструктивной системы без дополнительного армирования на 9 % больше, по сравнению с конструкцией, в которой установлено дополнительное армирование. Это объясняется включением в работу арматурных стержней в сжатой зоне ригелей.

Максимальные перемещения при аварийном воздействии без дополнительного армирования составили 1/30, а с его использованием – 1/40 расчетного пролета, что не превышает допустимых нормами значений.

#### Заключение

Выполненный расчетный анализ показал, что установка дополнительного армирования в виде

канатной арматуры в ригелях способна эффективно снизить внутренние усилия в элементах несущей системы и повысить живучесть рамных железобетонных каркасов. Установлено также, что деформативность ригелей снизилась на 23 %, а растягивающие напряжения в арматуре уменьшились на 9 %. Введение дополнительных элементов армирования, способных включаться в работу после аварийного воздействия и предотвращать его распространение на остальные элементы несущей системы, требует дальнейших, в том числе экспериментальных исследований. Перспективным представляется использование предлагаемого способа для зданий, проектируемых для сейсмоопасных районов.

#### Список литературы

1. Любомирский Н. В. Анализ опасности прогрессирующего обрушения монолитного железобетонного каркаса 19-этажного жилого дома в г. Евпатория / Н. В. Любомирский, С. В. Родин, П. А. Кореньков, Р. С. Абселямов // Строительство и реконструкция. – 2014. – № 5 (55). – С. 38–46.
2. Колчунов В. И. Некоторые проблемы живучести железобетонных конструктивных систем при аварийных воздействиях / В. И. Колчунов, Н. В. Федорова // Вестник НИЦ «Строительство». – 2018. – № 1 (16). – С. 115–119.
3. Травуш В. И. Защита зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения в рамках законодательных и нормативных требований / В. И. Травуш, В. И. Колчунов, Е. В. Леонтьев // Промышленное и гражданское строительство. – 2019. – № 2. – С. 46–54.
4. Кореньков П. А. Живучесть монолитных железобетонных рамно-стержневых конструктивных систем многоэтажных зданий : автореф. дис. ... канд. тех. наук / П. А. Кореньков. – Симферополь, 2017. – С. 64–89.
5. Федорова Н. В. Анализ особенностей сопротивления прогрессирующему обрушению конструктивных систем зданий и сооружений при внезапных структурных перестройках : аналитический обзор научных исследований / Н. В. Федорова, С. Ю. Савин // Строительство и реконструкция. – 2021. – № 3. – С. 76–108.
6. Травуш В. И. Безопасность среды жизнедеятельности – смысл и задача строительной науки / В. И. Травуш, С. Г. Емельянов, В. И. Колчунов // Промышленное и гражданское строительство. – 2015. – № 7. – С. 20–27.
7. Колчунов В. И. Расчетный анализ способов защиты монолитных каркасов многоэтажных зданий с плоскими перекрытиями от прогрессирующего обрушения / В. И. Колчунов, В. С. Московцева, О. Б. Бушова, Д. И. Жуков // Строительство и реконструкция. – 2021. – № 4. – С. 35–44.
8. Емельянов С. Г. Особенности проектирования узлов конструкций жилых и общественных зданий из панельно-рамных элементов для защиты от прогрессирующего обрушения / С. Г. Емельянов, Н. В. Федорова, В. И. Колчунов // Строительные материалы. – 2017. – № 3. – С. 23–26.
9. Колчунов В. И. Деформирование железобетонных каркасов многоэтажных зданий в запрельных состояниях при особых воздействиях / В. И. Колчунов, О. Б. Бушова // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. – 2022. – Т. 18, № 4. – С. 297–306.
10. Ву Н. Т. Деформирование и разрушение конструкций железобетонных каркасов многоэтажных зданий в запрельных состояниях : автореф. дис. ... канд. тех. наук / Н. Т. Ву. – Курск, 2020. – С. 6–12.



11. Кореньков П. А. Анализ опасности прогрессирующего обрушения монолитного железобетонного каркаса 22-х этажного торгово-офисного центра в г. Севастополе / П. А. Кореньков, В. В. Жгина // Строительство и техногенная безопасность. – 2012. – № 44. – С. 14–22.
12. Конструктивная пожарная инженерия в управлении стадией проектирования высотного здания с учетом требований безопасности / В. С. Федоров, Т. В. Золина, Н. В. Купчикова, А. С. Реснянская // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. – 2022. – № 3 (41). – С. 141–144.
13. Fedorov V. S. Optimization in the management of investment and construction projects / V. S. Fedorov, N. V. Kupchikova // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. – 2018. – No. 3(25). – Pp. 14–17.
14. Yu J. Experimental and numerical investigation on progressive collapse resistance of reinforced concrete beam column sub-assemblages / J. Yu, K. H. Tan // Engineering Structures. – 2013. – Vol. 55. – Pp. 90–106.
15. Deng X.-F. Effects of high-strength concrete on progressive collapse resistance of reinforced concrete frame / X.-F. Deng, S.-L. Liang, F. Fu, K. Qian // Journal of Structural Engineering. – 2020. – Vol. 146, issue 6. – Article 04020078.
16. Alogla K. Theoretical assessment of progressive collapse capacity of reinforced concrete structures / K. Alogla, L. Weekes, L. Augustus-Nelson // Magazine of Concrete Research. – 2017. – Vol. 69, no. 3. – Pp. 145–162.
17. Shan S. Experimental study on the progressive collapse performance of RC frames with infill walls / S. Shan, Sh. Li, Sh. Xu, L. Xie // Engineering Structures. – 2016. – Vol. 111. – Pp. 80–92.

© П. А. Кореньков, В. В. Герман

**Ссылка для цитирования:**

Кореньков П. А., Герман В. В. Оценка влияния дополнительных связей при анализе опасности прогрессирующего обрушения // Инженерно-строительный вестник Прикаспия : научно-технический журнал / Астраханский государственный архитектурно-строительный университет. Астрахань : ГАОУ АО ВО «АГАСУ», 2023. № 3 (45). С. 11–15.

УДК 665.775.4  
DOI 10.52684/2312-3702-2023-45-3-15-22

**СРАВНЕНИЕ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ДОРОЖНЫХ ВЯЖУЩИХ МЕТОДОМ ABCD**

*Д. Ю. Небратенко*

**Небратенко Дмитрий Юрьевич**, кандидат химических наук, доцент кафедры «Автомобильные дороги, аэродромы, основания и фундаменты», Российский университет транспорта (МИИТ); доцент кафедры «Химия и технология переработки эластомеров», МИРЭА-Российский технологический университет, г. Москва, Российская Федерация, тел.: + 7 (916) 936-35-81; e-mail: nebratenko@mail.ru

Вопросы безремонтной эксплуатации автомобильных дорог в условиях континентального климата, характерного для значительной части Российской Федерации, особенно остро стоят в зимний период. Использование нового подхода для определения температуры растрескивания битумных вяжущих (метод ABCD) позволило провести изучение низкотемпературных свойств исходного битума нефтяного дорожного вязкого БНД 70/100 и полученных на его основе двух марок полимерно-битумных вяжущих ПБВ 40 и ПБВ 60 (в южных регионах России). В результате проведенных исследований показана возможность обоснованного выбора типа и марки вяжущего, соответствующего реальным региональным условиям низкотемпературной эксплуатации автомобильных дорог, без предварительных знаний о компонентном составе, физико-химическом строении, а также эксплуатационных и реологических свойствах битумных вяжущих.

**Ключевые слова:** температура растрескивания вяжущих, метод ABCD, битумы нефтяные дорожные, бутадиен-стирольные термоэластопласты.

**COMPARISON OF LOW-TEMPERATURE INDICATORS OF ROAD BINDERS BY THE ABCD METHOD**

*D. Yu. Nebratenko*

**Nebratenko Dmitriy Yuryevich**, Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor of the Department "Highways, Airfields, Bases and Foundations", Russian University of Transport (MIIT); Associate Professor of the Department "Chemistry and Technology of Elastomer Processing", MIREA-Russian Technological University, Moscow, Russian Federation, phone: + 7 (916) 936-35-81; e-mail: nebratenko@mail.ru

The issues of maintenance-free operation of highways in the conditions of the continental climate characteristic of a significant part of the Russian Federation are particularly acute in winter. The use of a new approach for determining the cracking temperature of bitumen binders (ABCD method) allowed us to study the low-temperature properties of the initial bitumen of petroleum road viscous BND 70/100 and the two grades of polymer-bitumen binders PBB 40 and PBB 60 obtained on its basis, the use of which is most appropriate in the southern regions of Russia. As a result of the conducted research, the possibility of a reasonable choice of the type and brand of binder corresponding to the real regional conditions of low-temperature operation of highways is shown, without prior knowledge of the component composition, physico-chemical structure, as well as the operational and rheological properties of bitumen binders.

**Keywords:** cracking temperature of binders, ABCD method, petroleum road bitumen, styrene-butadiene thermoelastoplast (SBS polymer).