

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ УРОВНЯ ВОДЫ В ОРОСИТЕЛЬНОМ КАНАЛЕ НА СОСТОЯНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО МАССИВА ГРУНТА

Г. В. Дегтярев, доктор технических наук

Д. В. Лейер, кандидат технических наук

О. Г. Дегтярева, доктор технических наук

Кубанский государственный аграрный университет им. И. Т. Трубилина,
г. Краснодар, Россия

Аннотация. Выполнены численные эксперименты с использованием конечно-элементного программного комплекса *Plaxis*. Разработана компьютерная расчетная модель системы «грунт – мостовой переход». Получены данные о развитии касательных и нормальных напряжений при изменении уровня воды в оросительном канале, транспортной нагрузки, а также сейсмических воздействиях на примере реального объекта. При анализе касательных и нормальных напряжений по грани мостового перехода выявлено, что наличие сейсмических воздействий на касательные напряжения в сечении практически не влияет и составляет не более 5 %. Однако моделирование асимметричной транспортной нагрузки влияет на величину касательных напряжений более чем на 40 %, что необходимо учитывать при численном моделировании в практике строительства.

Ключевые слова: напряженно-деформированное состояние, грунтовый массив, уровень воды, оросительный канал, математическая модель, численный расчет, метод конечных элементов, мостовой переход, напряжения.

G. V. Degtyarev, D. V. Leyer, O. G. Degtyareva
**ASSESSMENT OF THE IMPACT OF WATER LEVEL IN
AN IRRIGATION CHANNEL ON THE STATE OF A STRESS-
STRAIN SOIL MASS**

Abstract. The study involved numerical experiments using the *Plaxis* finite element software package. A computer calculation model of the soil-bridge system was developed. Data on the development of tangential and normal stresses during changes in the water level in the irrigation canal, transport load, and seismic impacts were obtained using a real object as an example. When analyzing tangential and normal stresses along the edge of the bridge, it was found that the presence of seismic impacts has virtually no effect on tangential stresses in the section and amounts to no more than 5 %. However, modeling an asymmetric transport load affects the value of tangential stresses by more than 40 %, which must be taken into account in numerical modeling in construction practice.

Keywords: stress-strain state, soil mass, water level, irrigation canal, mathematical model, numerical calculation, finite element method, bridge crossing, stresses.

Введение

Строительство и капитальный ремонт инфраструктурных объектов на слабых грунтах остаются сложной инженерной задачей, требующей баланса между надежностью и экономической целесообразностью. В исследовании на примере проектирования мостового перехода в Краснодарском крае (Россия) продемонстрировано, как рациональное усиление слабого грунтового основания позволяет разработать экономически эффективные конструктивные решения мостового перехода без ущерба для безопасной эксплуатации.

Материалы и методы исследования

Анализ чрезвычайных ситуаций на автомобильных дорогах Краснодарского края и чер-

В статье проанализировано влияние уровня воды в канале оросительной системы на нормальные и касательные напряжения по грани железобетонной конструкции, водопроводной системы и мостового автомобильного перехода, выявлена динамика изменения напряженно-деформированного состояния грунтового массива при различных сочетаниях нагрузок и изменении уровня воды. Численное моделирование выполнено с использованием конечно-элементной геотехнической программы *Plaxis*.

номорского побережья показал, что основной из причин нарушения безопасной эксплуата-

ции объектов инфраструктуры является переувлажнение грунтового массива [1–3], что приводит к образованию оползней, селей, а также к нарушению целостности конструктивных элементов мостов. Численное моделирование с использованием современных конечно-элементных программных комплексов является апробированным и внедренным методом проектирования в ряде сложных систем [4–7]. Численное моделирование системы «грунт – мостовой переход» выполнено с использованием модели Мора – Кулона [8–10].

В качестве объекта исследования и моделирования выбрано водопропускное сооружение на участке ремонтируемой автодороги – трехпролетный мост через канал длиной 18,05 м (рис. 1, 2; здесь и далее – авторские фото). Для выявления технического состояния данного мостового перехода осуществлены мониторинг и рекогносцировочное обследование территории [11, 12]. Анализ риска деформации при изменении факторов, влияющих на систему, и их сочетаний, является неотъемлемой частью современного проектирования [13–16].

Рассматриваемый участок автомобильной дороги относится к IV технической категории. Анализ метеоусловий выявил возможность периодического возникновения экстремальных гидрометеорологических характеристик. При разработке проектных решений следует учитывать возможность проявления таких опасных метеорологических процессов и явлений, как ветер, дожди, гололед.

На исследуемом участке автодорога пересекается с распределительным каналом Федоровской оросительной системы Р-16-3. Это искусственный водоток, звено левобережных рисовых оросительных систем, источником орошения которых служат воды р. Кубани.



Рис. 1. Участок перехода автодороги через переходной мост. Канал оросительной системы

Сбросные воды из систем поступают в главный Афипский коллектор, а затем используются при орошении или перекачиваются в Варнавинское водохранилище, Варнавинский сбросной канал и в р. Кубань. Максимальный расход канала в створе моста составляет 11,0 м³/с.

Максимальные расходы воды на пересечаемом канале Р-16-3 формируются в поливной период (с апреля по сентябрь), когда канал заполнен водой. Максимальный уровень воды канала – при максимальном расходе 11,0 м³/с – составляет 7,29 м. В ходе рекогносцировочного обследования было выявлено следующее состояние элементов мостового перехода:

- покрытие – неудовлетворительное;
 - опоры – неудовлетворительное;
 - сопряжение с насыпью – неудовлетворительное;
 - ограждения – неудовлетворительное;
 - деформационные швы – неудовлетворительное;
 - водоотвод – неудовлетворительное;
 - пролетные строения – удовлетворительное;
 - тротуары – удовлетворительное;
 - перила – удовлетворительное;
 - конуса – удовлетворительное;
 - гидроизоляция – неудовлетворительное
- (рис. 3–6).

По результатам обследования дана общая экспертная оценка состояния сооружения в соответствии с Ведомственными строительными нормами (ВСН 4-81) – неудовлетворительное. Согласно итогам рекогносцировочного обследования принято решение о необходимости демонтажа названного мостового перехода и разработке новых конструктивных решений с учетом изменений в системе «грунт – мостовой переход».



Рис. 2. Правобережный откос канала ниже моста. Разрушение плит крепления откоса



Рис. 3. Разрушение защитного слоя бетона в пролете № 2 (вид от начала моста с правой стороны)



Рис. 4. Общий вид промежуточной опоры № 2 (вид с правой стороны от конца моста)



Рис. 5. Скол бетона в плите П8 пролета № 2 в зоне водоотводной трубки. Коррозия водоотводной трубки



Рис. 6. Разрушение стыка омоноличивания блоков насадки опоры № 2 над сваей № 3

По результатам инженерно-геологических изысканий получены зависимости просадочных свойств грунта от глубины и приложенного давления (рис. 7).

Кривая 1 (слева) изменения бытового давления показывает следующее:

1) форма кривой начинается с низких значений давления (близких к 0 МПа), что соответствует положению на малых глубинах (0–2 м). С увеличением глубины давление растет, кривая имеет нелинейный характер – возможно, близкий к экспоненциальному или степенному закону;

2) интерпретация: кривая отражает естественное (бытовое) давление в грунте, которое увеличивается с глубиной из-за веса вышележащих слоев. Резкий рост на небольших глубинах указывает на слабые поверхностные слои (например, рыхлые насыпные грунты), а

на больших глубинах – на наличие уплотненных глин или суглинков.

Кривая 2 (справа) – начальное просадочное давление:

1) форма кривой: давление также увеличивается с глубиной, но зависимость ближе к линейной или слабо изогнутой. На малых глубинах значения могут быть выше, чем на левом графике, что указывает на необходимость меньшего дополнительного давления для просадки;

2) интерпретация: свидетельствует, какое дополнительное давление (кроме бытового) нужно приложить, чтобы началась просадка грунта. Более пологий характер кривой может означать, что с глубиной грунт становится менее просадочным (например, из-за увеличения плотности или уменьшения пористости).

Сравнение графиков.

- На малых глубинах (0–3 м) бытовое давление низкое, но начальное просадочное может быть значительным (например, для лессовых грунтов);
- на больших глубинах (более 5 м) оба давления растут, но разница между ними может сокращаться, что говорит об уменьшении просадочности.

Грунт на поверхности более склонен к просадке при малых нагрузках, но с глубиной эта способность снижается. Бытовое давление растет быстрее, чем просадочное, что может указывать на зоны, где риск просадки особенно высок (например, на глубине 2–4 м).

На основании представленных графиков можно определить мощность слабых грунтов. Данное исследование позволяет эффективно расположить проектируемое сооружение мостового перехода и выполнить замену слабых грунтов оснований.

На рис. 8 показан график зависимости относительной просадочности грунта от приложенного давления. Кривая просадки грунта имеет характерную форму. Вначале, при низком давлении (примерно до 0,05–0,1 МПа), просадочность близка к нулю или очень мала. Затем кривая круто возрастает, достигая максимума (пика просадки) при определенном давлении (в диапазоне 0,2–0,3 МПа). После этого пика просадочность может снижаться или стабилизироваться, что означает завершение основной фазы просадки.

На кривой можно выделить несколько участков. Первый – зона начального уплотне-

ния, где при малых давлениях грунт немного сжимается, но без существенной просадки. Далее следует зона активной просадки, в которой наблюдается резкий рост деформации из-за потери структурной прочности грунта (например, при разрушении пор или вымывании солей). После этого наступает зона стабилизации, где дальнейшее увеличение давления уже не вызывает значительной просадки, так как грунт уже уплотнился.

Ключевыми точками на графике являются: начальное просадочное давление (P_0) – минимальная нагрузка, при которой начинается просадка (точка перегиба в начале кривой); максимальная просадочность (ε_{\max}) – пик кривой, после которого деформации замедляются; давление стабилизации (P_{stab}) – нагрузка, при которой просадка практически прекращается. Такая кривая характерна для просадочных грунтов: чем круче подъем кривой, тем более опасен грунт для строительства, поскольку даже небольшая нагрузка может вызвать резкую просадку.

Практическое значение этого графика заключается в том, что он позволяет определить безопасную нагрузку на фундамент (например, чтобы давление не превышало P_0) и оценить необходимость укрепления грунта методами замены грунта, трамбовки, цементации или дренажа. Данные таблицы свидетельствуют, что коэффициент фильтрации грунта очень низкий, то есть отдача воды происходит крайне медленно и сложно.

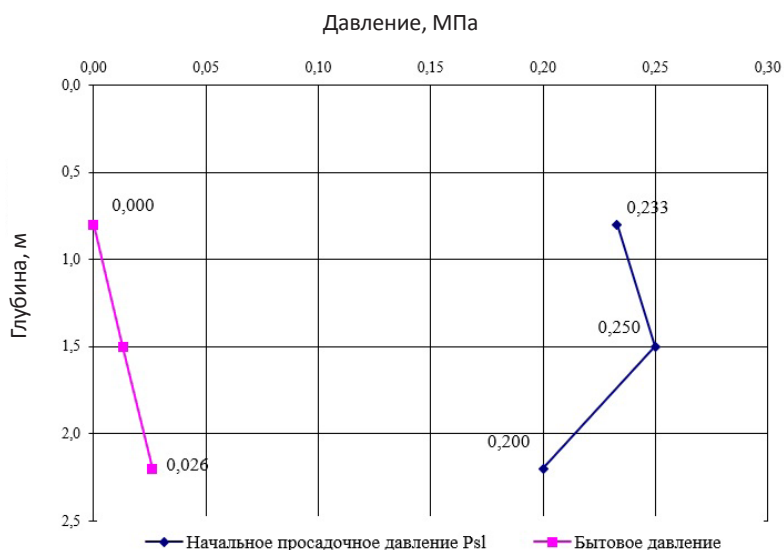


Рис. 7. Бытовое и начальное просадочное давление

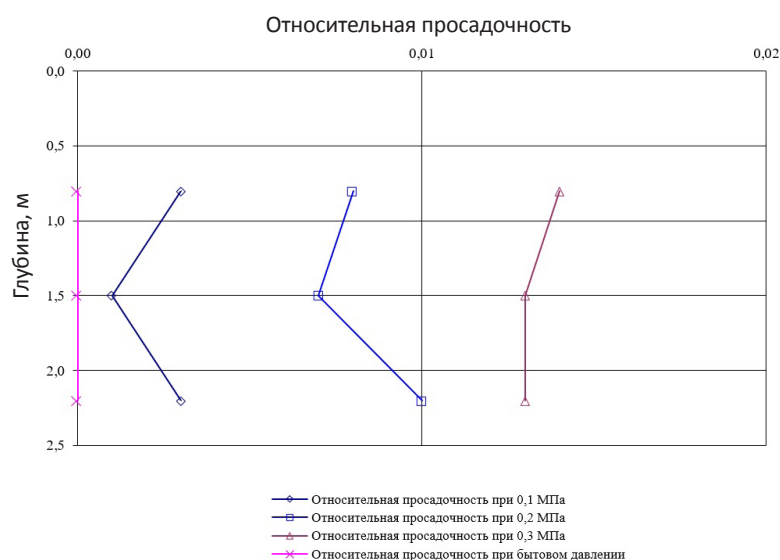


Рис. 8. Относительная просадочность при различных давлениях

Таблица. Результаты определения коэффициента фильтрации грунтов

| Инженерно-геологические элементы | Скважина | Глубина отбора, м | Коэффициент фильтрации, м/сут |
|----------------------------------|----------|-------------------|-------------------------------|
| 1 | 1 | 1,0 | 0,100 |
| | 1 | 2,0 | 0,089 |
| | 2 | 1,0 | 0,101 |
| | 4 | 1,0 | 0,088 |
| Нормативное значение | | | 0,095 |
| 3 | 1 | 3,0 | 0,075 |
| | 1 | 4,0 | 0,085 |
| | 3 | 2,0 | 0,113 |
| | 3 | 3,0 | 0,121 |
| Нормативное значение | | | 0,099 |
| 1a | 2 | 2,0 | 0,122 |
| | 3 | 1,0 | 0,128 |
| | 3 | 1,5 | 0,099 |
| Нормативное значение | | | 0,099 |

Результаты исследования и их обсуждение

Расчет прочности и деформаций конструкций выполнен в программе *Plaxis* [6–9] для анализа взаимодействия системы «грунт – мостовой переход». Схема проектируемого мостового перехода (водопропускная система) представлена на рис. 9, 10. Для разработки технико-экономически эффективного конструктивного решения данного объекта рассмотрен вариант замены слабых грунтов основания бутовым камнем.

Для анализа напряженно-деформированного состояния грунтового массива и конструкции использован метод конечных элементов, позволивший учесть влияние уровня воды в канале на железобетонную конструкцию мостового перехода (рис. 11, 12). В расчетах рассмотрены два положения уровня воды в оросительном канале – высокий уровень (ВУВ) и низкий (НУВ), а также два сочетания нагрузок: основное (транспортные

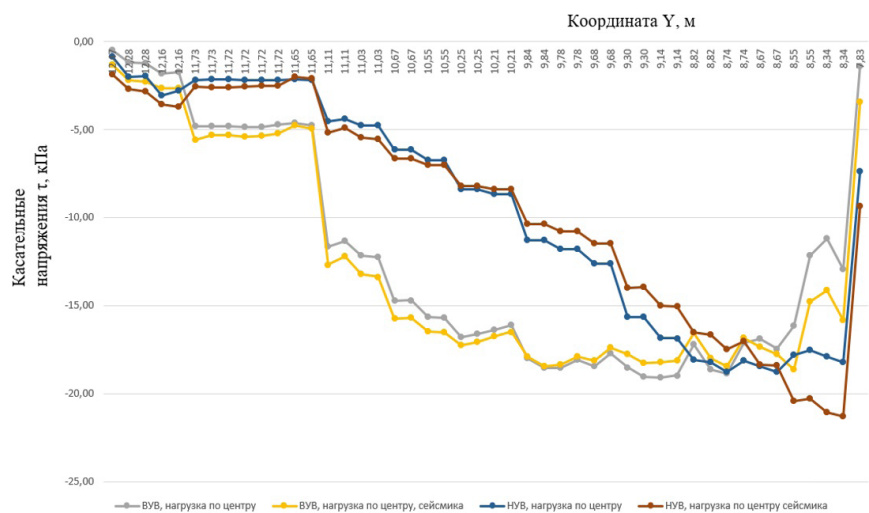


Рис. 12. График зависимости касательных напряжений по глубине грунтового массива при расположении транспортной нагрузки по центру мостового перехода

Исследование влияния уровня воды (ВУВ и НУВ) на касательные напряжения в грунте при расположении транспортной нагрузки слева от мостового перехода показало, что при ВУВ в оросительном канале напряжения возрастают из-за снижения несущей способности водонасыщенного грунта. Кривые для ВУВ и НУВ могут расходиться, показывая, насколько увлажнение усиливает деформационные процессы. Максимальные напряжения наблюдаются на уровне подошвы мостового перехода. Изменение уровня воды в оросительном канале приводит к колебаниям напряжений, что составляет 38 %. Сейсмические воздействия практически не оказывают воздействия; прирост напряжений составляет около 5 %.

В работе проведено исследование распределения касательных напряжений по глубине при разных положениях транспортной нагрузки (например, по центру, слева или справа) в рамках основного сочетания нагрузок (без учета сейсмики). Это позволило выявить асимметрию напряженного состояния и зоны риска при смещении нагрузки. При увеличении глубины влияние транспортной нагрузки снижается. Наиболее критичной ситуацией является наличие ВУВ при центрально расположенной нагрузке. Изменение касательных напряжений при повышении уровня воды в оросительном канале составляет 38 % при асимметричной нагрузке и до 60 % – при центральном нагружении. При учете сейсмических

воздействий (8 баллов) наблюдаются резкие перепады касательных напряжений на отметках подстилающего слоя грунта. Увеличение касательных напряжений при изменении положения нагрузки при ВУВ в оросительном канале составляет 34 %, при низком – 41 %.

Анализ изменения нормальных напряжений (σ) по глубине при основном сочетании нагрузок позволил выявить равномерное сжатие и локальные зоны разгрузки. При асимметричном положении нагрузки до координаты 10 м (по вертикали) уровень воды почти не влияет на нормальные напряжения, а далее происходит их снижение (результат гидростатического давления на массив грунта). Сейсмические воздействия приводят к увеличению нормальных напряжений в зонах водонасыщенного грунта, что указывает на риск локальных просадок или разрушения грунта при динамических нагрузках. Наиболее опасной расчетной ситуацией является низкий уровень воды в канале.

Для обеспечения нормальной эксплуатации системы «грунт – мостовой переход» в качестве мероприятий по усилению грунтов основания и предотвращения резких перепадов напряжений в качестве геотехнических решений строительства была выполнена замена слабого грунта ИГЭ-3 ($R_0 = 196$ кПа) на камень бутовый фр. 70–300 мм М800. Проверка несущей способности подстилающего слоя выполнена по СП 35.13330.2011¹, где расчетное сопротивление основания R составило 1373,62 кПа.

¹ Мосты и трубы: СП 35.13330.2011. Москва: ФГБУ «РСТ», 2024. 567 с.

Выводы

1. Компьютерное моделирование методом конечных элементов с использованием модели грунта Мора – Кулона в программе *Plaxis* позволило оценить напряженно-деформированное состояние грунтового массива под мостовым переходом с учетом вариаций уровня воды в оросительном канале и сейсмических воздействий. Полученные расчетные показатели деформации существующей конструкции мостового перехода коррелируют с данными рекогносцировочного обследования.

2. Изменение уровня воды в оросительном канале (высокий и низкий уровни воды) существенно влияет на распределение касательных напряжений в грунтовом массиве. При повышении уровня воды наблюдается рост касательных напряжений до 38 % из-за снижения несущей способности водонасыщенного грунта. Наибольшие напряжения фиксируются на уровне подошвы мостового перехода, что указывает на критическую зону влияния водонасыщения грунтов основания.

3. Расположение транспортной нагрузки (по центру и слева) значительно изменяет величину касательных напряжений – разница может превышать 40 %. Наиболее опасна ситуация центрального приложения нагрузки в сочетании с высоким уровнем воды, где изменение напряжений достигает 60 %. Асимметричное приложение нагрузки вызывает неравномерное распределение напряжений, формируя зоны риска в грунтовом массиве.

4. Сейсмические нагрузки (8 баллов) не оказывают существенного влияния на касательные напряжения, их вклад не превышает 5 %. Однако при сейсмическом воздействии наблюдаются резкие перепады напряжений на границах слоев грунта, особенно в подстилающих слоях. Нормальные напряжения в зонах водонасыщенного грунта под действием сейсмики увеличиваются, что повышает риск локальных

просадок или разрушения. Касательные напряжения возрастают с глубиной, но резко снижаются на отметке ~8,34 м, где расположен более прочный слой — гравийно-песчаная смесь искусственного основания.

5. Влияние транспортной нагрузки на напряжения уменьшается с увеличением глубины. Нормальные напряжения демонстрируют равномерное сжатие и локальные зоны разгрузки; ниже 10 м начинает заметно сказываться влияние гидростатического давления.

6. Замена слабого грунта (ИГЭ-3, $R_0 = 196$ кПа) на бутовый камень фр. 70–300 мм М800 позволила значительно повысить несущую способность основания. Расчетное сопротивление основания R после усиления составило 1373,62 кПа, что соответствует требованиям СП 35.13330.2011. Данное конструктивное решение обеспечивает снижение риска резких перепадов напряжений и повышает долговечность системы «грунт – мостовой переход».

7. При проектировании мостовых переходов в условиях изменяющегося уровня воды необходимо учитывать возможность роста касательных напряжений до 40 %. Обязателен учет асимметричного положения транспортной нагрузки в расчетных моделях. Хотя сейсмические воздействия незначительно влияют на средние значения напряжений, они могут вызывать локальные пики напряжений в переходных зонах грунтов. Необходим регулярный мониторинг уровня воды и состояния грунтов в зоне опор в целях безопасной эксплуатации сооружений.

8. Таким образом, проведенное исследование подтвердило высокую чувствительность системы «грунт – мостовой переход» к изменению уровня воды и схемы нагружения, а также показало эффективность применения усиления основания для обеспечения надежности и долговечности конструкции.

Библиографический список

1. Причины активизации оползня на Федеральной автомобильной дороге г. Сочи и мероприятия по его стабилизации / А. Н. Богомолов, С. И. Маций, С. Ю. Калашников [и др.] // Вестник Волгоград. гос. архитектур.-строит. ун-та. Серия: Строительство и архитектура. – 2012. – № 29 (48). – С. 6–14.
2. Стабилизация оползня на участке строительства железной дороги в г. Сочи / А. Н. Богомолов [и др.] // Вестник Волгоград. гос. архитектур.-строит. ун-та. Серия: Строительство и архитектура. – 2012. – № 29 (48). – С. 15–25.

3. Analysis of the stability of the Kuban river landslide slope involving the materials of land-slide hazard monitoring / M. A. Bandurin, V. A. Volosukhin, I. A. Prikhodko, A. A. Rudenko // Construction and Geotechnics. – 2023. – Vol. 14, No. 4. – P. 62–74. <https://doi.org/10.15593/2224-9826/2023.4.05>
4. Дегтярев, В. Г. Численное моделирование и цифровой математический анализ при исследовании сложных систем / В. Г. Дегтярев, Г. В. Дегтярев, О. Г. Дегтярева // Изв. Нижневолж. агроуниверситет. комплекса: наука и высшее профессиональное образование. – 2023. – № 3 (71). – С. 540–553. <https://doi.org/10.32786/2071-9485-2023-03-53>
5. Lari, S. A probabilistic approach for landslide hazard analysis / S. Lari, P. Frattini, G. B. Crosta // Engineering Geology. – 2014. – Vol. 182, Part A. – P. 3–14. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2014.07.015>
6. Finite-element simulation of possible natural disasters on landfall dams with changes in climate and seismic conditions taken into account / M. A. Bandurin [et al.] // Journal of Physics: Conf. Series 1015 (2018) 032011. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1015/3/032011>
7. Degtyarev, G. V. The water structures' operability analysis, taking into account damage and certain negative factors / G. V. Degtyarev, N. A. Bakhtamyan // IOP Conference Series: materials science and engineering. – 2020. – Vol. 913, No. 2. – P. 022–053. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/913/2/022053>
8. Сравнение расчетных методов «Мора – Кулона» и «упрочняющего грунта» при моделировании подпорных стен / С. И. Маций, А. К. Рябухин, В. А. Лесной, Д. В. Лейер, Л. А. Сухляева // Механика грунтов в геотехнике и фундаментостроении : материалы Междунар. науч.-техн. конф., Новочеркасск, 29–31 мая 2018 г. / Южно-Рос. гос. политех. ун-т им. М. И. Платова. – Новочеркасск : ООО «Лик, 2018». – С. 382–390.

Поступила 1 сентября 2025 г.