

Исследование трещинообразования в изгибаемых и растянутых железобетонных элементах

А.Н. Топилин, Д.Д. Гречушкина, А.Р. Ноздрачева

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, г. Москва

Аннотация: В статье рассмотрены результаты комплексного исследования процессов трещинообразования в изгибаемых и растянутых железобетонных конструкциях. Предложена методика расчета железобетонных балок, позволяющая определить расстояние между трещинами, подтвержденная проведенными экспериментальными исследованиями конечно-элементных моделей и физических образцов. Результаты исследования направлены на повышение надёжности, долговечности и эффективности проектирования современных железобетонных конструкций.

Ключевые слова: Железобетонные конструкции, процесс трещинообразования, расстояние между трещинами, преднапряженный, численное моделирование, программный комплекс, сцепление, методика расчета, растяжение, изгиб.

Введение

Железобетонные конструкции широко используются в современном строительстве благодаря их высокой прочности, долговечности и экономичности. Первая железобетонная конструкция появилась еще в середине 19-го века, однако до сих пор есть ряд проблем, с которыми сталкивается отрасль. Одна из основных – трещинообразование. Процесс зарождения, развития и распространения трещин безусловно оказывает огромное влияние на надежность и долговечность железобетонных элементов. Трещины, возникающие от приложения различных нагрузок и воздействий окружающей среды, могут приводить к снижению несущей способности конструкций, ускорению коррозии арматуры и, как следствие, к уменьшению срока службы зданий и сооружений.

Изучение трещинообразования в целом, в изгибаемых и растянутых железобетонных элементах в частности, имеет особое значение, поскольку эти типы элементов широко распространены в практике строительства.

Настоящая работа посвящена исследованию закономерностей трещинообразования в изгибаемых и растянутых железобетонных элементах.

Тема безусловно остается одной из актуальных проблем современного инженерного дела.

Сейчас нормативным документом для определения расстояния между трещинами в растянутых и изгибаемых железобетонных элементах является СП 63.13330.2018 «Бетонные и железобетонные конструкции».

В действующих нормах базовое расстояние между трещинами l_s определяется достаточно сложно, многоступенчато, с использованием эмпирических коэффициентов. В большинстве случаев результат получается завышенным. Из-за этого в СП приведены ограничения для этого параметра, которыми и приходится пользоваться.

Авторы данной работы предлагают альтернативный расчет для определения расстояния между трещинами в растянутых и изгибаемых железобетонных элементах, в основе которого лежат физические законы равновесия и идеи высказанные еще классиками железобетона Мурашовым В.М.[1], Байковым В.Н.[2].

Основная часть

Растянутые железобетонные элементы.

Рассмотрим трещинообразование в растянутых железобетонных элементах. Согласно [3], сила, вызывающая появление трещин в растянутом элементе, равна:

$$N_{crc} = R_{bt,ser} A_b + 2\alpha R_{bt,ser} A_s n = R_{bt,ser} (A_b + 2\alpha A_s n), \quad (1)$$

где n – количество арматурных стержней; α – коэффициент приведения, вычисляемый как E_s/E_b .

В сечении с образовавшейся трещиной всю силу N_{crc} воспринимает арматура. В сечении между трещинами арматура продолжает работать совместно с бетоном, а значит в ней остается усилие $2\alpha R_{bt,ser} A_s$.

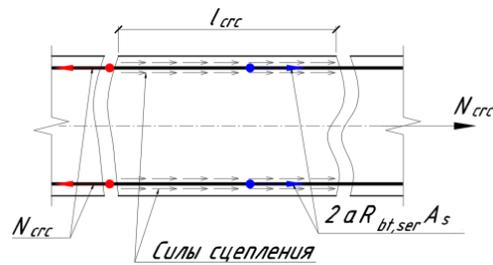


Рис.1 – Усилия в растянутом элементе (с трещинами)

Исходя из условия равновесия проекций всех сил на продольную ось элемента, разница между N_{crc} и $2\alpha R_{bt,ser} A_s n$ [1] будет уравниваться силами сцепления арматуры с бетоном согласно [1, 3]:

$$R_{bt,ser} A_b + 2\alpha R_{bt,ser} A_s n = 2\alpha R_{bt,ser} A_s n + R_{bound} u_s l_{crc} n \quad (2)$$

$$R_{bt,ser} A_b = R_{bound} u_s l_{crc} n, \text{ где} \quad (3)$$

u_s – периметр арматурного стержня;

R_{bound} – расчетное сопротивление сцепления арматуры с бетоном, принимаемое равномерно распределенным по длине анкеровки согласно СП 63.13330.2018 «Бетонные и железобетонные конструкции»:

$$R_{bound} = \eta_1 \eta_2 R_{bt,ser}, \text{ где коэффициенты:} \quad (4)$$

η_1 – учет влияния вида поверхности арматурного стержня, η_2 – учет влияния диаметра арматуры по п. 10.3.24 СП;

Выразим l_{crc} из выражения (3):

$$l_{crc} = \frac{R_{bt,ser} A_b}{R_{bound} u_s n} = \frac{R_{bt,ser} A_b}{R_{bt,ser} \eta_1 \eta_2 u_s n} = \frac{A_b}{\eta_1 \eta_2 u_s n} = \frac{A_b}{\eta_1 \eta_2 \pi d n} \quad (5)$$

Полученная по итогам преобразований формула шага трещин в центрально растянутых элементах максимально приближена к реальным результатам экспериментов.

Изгибаемые железобетонные элементы.

Рассмотрим процесс образования трещин в изгибаемых железобетонных элементах. С учетом работы арматурных стержней на

растяжение, трещиностойкость элемента может быть описана следующим образом:

$$M_{crc} = R_{bt,ser} W_{pl} + 2\alpha R_{bt,ser} A_s e_s n \quad (6)$$

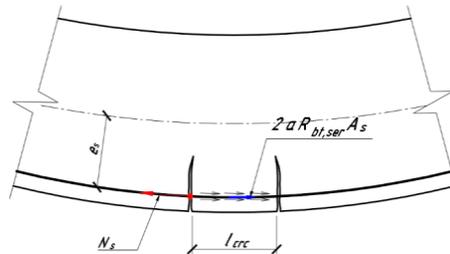


Рис.2 – Схема усилий в растянутой арматуре между трещинами изгибаемого элемента

По аналогии с растянутыми элементами запишем уравнение равновесия сил, действующих в арматуре, в трещине и на участке между трещинами с учетом сил сцепления.

Сила N_s , воспринимаемая арматурой в трещине, равна:

$$N_s = \frac{M_{crc}}{e_s} = \frac{(R_{bt,ser} W_{pl} + 2\alpha R_{bt,ser} A_s e_s n)}{e_s} = \frac{R_{bt,ser} W_{pl}}{e_s} + 2\alpha R_{bt,ser} A_s n \quad (7)$$

В зоне между трещинами:

$$N_{st} = 2\alpha R_{bt,ser} A_s n \quad (8)$$

Учитывая силы сцепления продольной арматуры с бетоном, равные $R_{bound} u_s l_{crc} n$ можно вычислить расстояние между трещинами [1].

Следовательно:

$$\frac{R_{bt,ser} W_{pl}}{e_s} = R_{bound} u_s l_{crc} n = \eta_1 \eta_2 R_{bt,ser} u_s l_{crc} n \quad (9)$$

Расстояние между трещинами l_{crc} получит вид:

$$l_{crc} = \frac{W_{pl}}{e_s \eta_1 \eta_2 n} \quad (10)$$

Для преднапряженных конструкций необходимо также учитывать усилие обжатия и предварительно напряженную арматуру [4, 5].

Преобразуем формулу (7), учитывая эти факторы:

$$M_{crc} = R_{bt,ser} W_{pl} + P(e_{sp} + r) + 2\alpha R_{bt,ser} A_s e_s n + 2\alpha R_{bt,ser} A_{sp} e_{sp} n \quad (11)$$

Как только образуются трещины, сила обжатия P перестает влиять на растянутую зону [2]. В зоне между трещинами с учетом сил сцепления получим:

$$M_{crc} = 2\alpha R_{bt,ser} A_s e_s n + 2\alpha R_{bt,ser} A_{sp} e_{sp} n + R_{bound} u_s n e_s l_{crc} + R_{bound} u_{sp} e_{sp} l_{crc} n \quad (12)$$

Тогда:

$$R_{bt,ser} W_{pl} = (R_{bound} u_s n e_s + R_{bound} u_{sp} e_{sp} n) l_{crc} \quad (13)$$

Следовательно:

$$l_{crc} = \frac{R_{bt,ser} W_{pl}}{R_{bt,ser} (e_s \eta_1 \eta_2 u_s n + e_{sp} \eta_1 \eta_2 u_{sp} n)} = \frac{W_{pl}}{e_s \eta_1 \eta_2 u_s n + e_{sp} \eta_1 \eta_2 u_{sp} n} \quad (14)$$

При отсутствии сцепления напрягаемой арматуры с бетоном, второе слагаемое в знаменателе будет равно нулю. Напрягаемую арматуру не учитываем [6, 7].

Экспериментальное подтверждение эффективности предложенной методики.

Для подтверждения эффективности данной методики были проведены испытания конечноэлементной модели в ПК «Abaqus» растянутого железобетонного бруса и изгибаемых железобетонных балок. Образцами Бм1 и Бм3 обозначили балки, имеющие сцепление арматуры с бетоном, образцом Бм2 – балку без сцепления арматуры с бетоном.

Растянутый элемент из бетона класса В20 имел размеры 2000х200х200 и армирован четырьмя продольными стержнями диаметром 10мм классаА500.

По формуле (5), подставив численные значения, получим расстояние между трещинами:

$$l_{crс} = \frac{A_b}{\eta_1 \eta_2 \alpha_s n} = \frac{20 \cdot 20}{2,5 \cdot 1 \cdot 3,14 \cdot 1 \cdot 4} = 12,74 \text{ см} \quad (15)$$

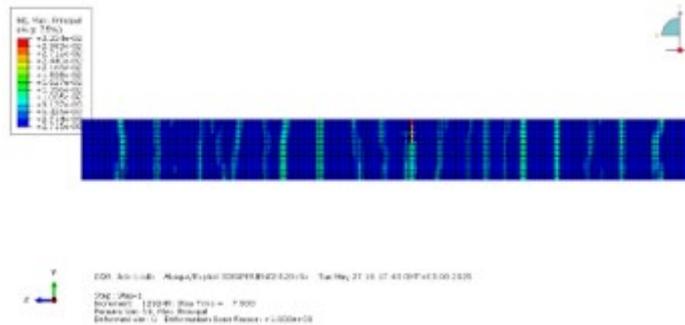


Рис.3 - Схема трещинообразования растянутого элемента.

Развитие трещин зафиксировано почти равномерным по длине всего сечения элемента.

На рис.3. видно, что всего в элементе образовалось 15 трещин. Вычислим усредненный шаг между ними:

$$\frac{L}{n+1} = \frac{200}{16} = 12,5 \text{ см} \quad (16)$$

По нашему расчету шаг трещин 12,75см. Наблюдается, фактически, полная сходимость результатов.

Для проверки методики на изгибаемых элементах были взяты результаты испытаний, проведенных в Московском государственном строительном университете (далее МГСУ) в 2020 году аспирантом Кео Ун. Все образцы подвергались нагрузке до разрушения с регистрацией деформаций, раскрытия трещин и характера разрушения [8, 9].

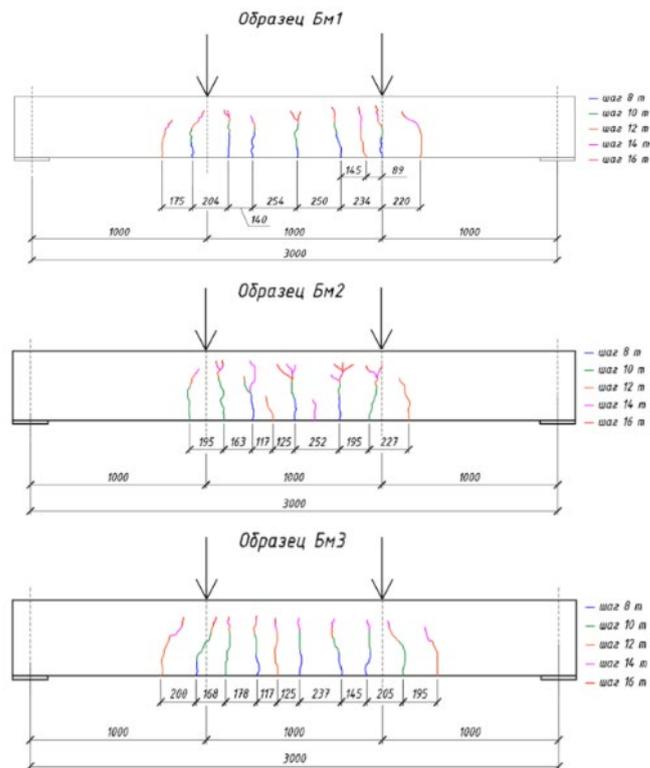


Рис.4. - Схема образования трещин и приложения нагрузки на балку.

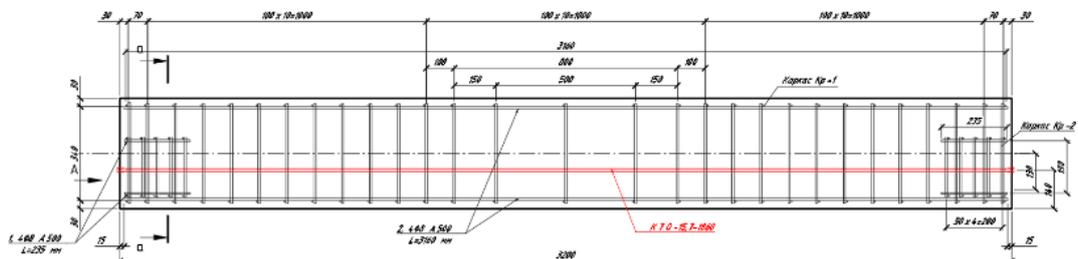


Рис.5. - Схема армирования опытных балок.

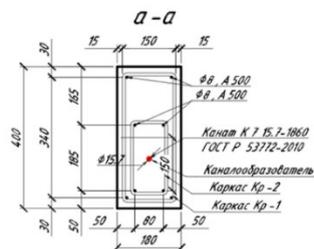


Рис.6. – Сечение балки вблизи опоры.

Момент сопротивления приведенного сечения:

$$W_{red} = \frac{I_{t,red}}{y_0} = \frac{97686,78}{19,93} = 4901,5 \text{ см}^3 \quad (17)$$

$$\text{Тогда, } W_{pl} = 1,3 \cdot W_{red} = 1,3 \cdot 4901,5 = 6371,9 \text{ см}^3$$

Для балок Бм1 и Бм3 вычислим расстояние между трещинами по формуле (14):

$$l_{crc} = \frac{6371,95}{17 \cdot 2,5 \cdot 1 \cdot 3,14 \cdot 0,8 \cdot 2 + 6 \cdot 2,2 \cdot 1 \cdot 3,14 \cdot 1,57} = 22,9 \text{ см} \quad (18)$$

Для балки Бм2 без сцепления арматуры с бетоном расстояние между трещинами вычислим по формуле (10):

$$l_{crc} = \frac{6371,95}{17 \cdot 2,5 \cdot 1 \cdot 3,14 \cdot 0,8 \cdot 2} = 29,8 \quad (19)$$

Приведем окончательные результаты расчета расстояния между трещинами по предложенной методике в сравнении с результатом расчета КЭ моделей и экспериментальных данных в таблице №1.

Таблица №1

Сравнение экспериментальных данных и результатов расчетов по предложенной методике

Марка элемента	Эксперимент, l_{crc} , см	Рез-ты l_{crc} , предложенной методики, см	Рез-ты по МКЭ	Δ , % $[\frac{2-3}{3}] \cdot 100$	Δ , % $[\frac{3-4}{4}] \cdot 100$
1	2	3	4	5	6
Бм1	21,6	22,9	25	5,8	8,4
Бм2	24,7	29,8	30	17,1	2,5
Бм3	19,5	22,9	25	14,9	8,4

Из сводной таблицы видно, что результаты, полученные при использовании предлагаемой методики по расчету шага трещин, близки к результатам расчета КЭ моделей. Расхождение менее 10%. Результаты предложенной методики занимают промежуточное положение между экспериментом и расчетом конечноэлементной модели, т.е. ближе к реальной картине трещинообразования. Во всех случаях реальный шаг трещин

оказался меньше расчетного. Это можно объяснить влиянием поперечной арматуры, которая увеличивает сцепление.

Заключение

Результатом проведенного исследования является усовершенствованная методика по расчету расстояния между трещинами в изгибаемых и растянутых железобетонных элементах. Этот параметр необходим для определения ширины раскрытия трещин, которая, в свою очередь, влияет на долговечность эксплуатации конструкции.

В ходе работы было получено хорошее соответствие результатов расчета, с использованием предложенной методики, в сравнении с экспериментальными данными.

В процессе исследования были сделаны следующие выводы:

1. Бетон грубо неоднородный материал. Появление первой трещины в бетонной балке или в балке без сцепления арматуры с бетоном приводит к разрушению [10, 11]. Наличие арматуры и сцепления ее с бетоном делает конструкцию более однородной.

2. Расстояние между трещинами зависит от сцепления арматуры с бетоном. Чем больше силы сцепления, тем больше однородность конструкции и тем равномернее и чаще появляются трещины и, соответственно, меньше раскрываются.

3. При отсутствии сцепления напрягаемой арматуры с бетоном, увеличивается расстояние между трещинами и ширина их раскрытия, что подтверждается и другими авторами [12, 13].

Предложенная методика расчёта шага трещин обеспечивает более достоверную картину образования трещин и может быть рекомендована для практического применения.

Перспективным направлением дальнейших исследований является экспериментальная проверка методики на элементах с различными типами анкеровки и поперечного армирования.

Литература

1. Байков В.Н., Сигалов Э.Е. Железобетонные конструкции: Общий курс: Учеб. для вузов – 5-е изд., перераб. и доп. Москва: Стройиздат, 1991. 767 с.
2. Мурашев В.И. Трещиноустойчивость, жесткость и прочность железобетона. Москва: Стройиздат, 1950. 114 с.
3. Залесов А.С., Кодыш Э.Н., Лемыш Л.Л., Никитин И.К. Расчёт железобетонных конструкций по прочности, трещиностойкости и деформациям. Москва: Стройиздат, 1988. 320 с.
4. Топилин А.Н., Веркеенко М.А., Варламова А.Д. Расчет предварительно напряженных конструкций без сцепления криволинейно расположенной арматуры с бетоном. Москва: Components of Scientific and Technological Progress, 2023 - №4(82). С. 12-22.
5. Топилин А.Н. Предложения по расчету предварительно напряженных железобетонных конструкций с применением высокопрочной арматуры, не имеющей сцепления с бетоном // Технология текстильной промышленности. Москва: 2019, №5(383). С. 233-237.
6. Topilin A.N., Verkeenko M.A., Varlamova A.D. Calculation of Pre-Stressed Structures using High-strength reinforcement without concreteto-steel bond // XXVI International Scientific Conference «Construction the Formation of Living Environment» (FORM-2023), Reliability of Buildings and Constructions, 2023. Pp 1-6.
7. Методическое пособие «Конструкции железобетонные монолитные с напрягаемой арматурой без сцепления с бетоном. Правила проектирования». Москва: Минстрой, 2017. – 109 с.

8. Топилин А.Н., Гнеушев И.И., Лучкин Е.А., Кео У. Анализ прочности постнапряженных железобетонных конструкций без сцепления арматуры с бетоном // Инновации и инвестиции. Москва: 2021. №3. С. 244-248.

9. Пастернак П.Л. Проектирования железобетонных конструкций. Москва: Стройиздат, 1966г. 380 с.

10. Вайсфельд А.А. Исследование напряженно-деформированного состояния нормальных сечений изгибаемых железобетонных элементов при частичном или полном отсутствии сцепления арматуры с бетоном: дисс. канд. техн. наук. Владивосток: 1982. 193 с.

11. Образцов Л.В. Исследование железобетонных предварительно напряженных балок без сцепления арматуры с бетоном на действие изгибающего момента и поперечной силы: дисс. канд. техн. наук. – Брест: 1980. 150 с.

12. Топилин А.Н., Бадаев М.И., Кео У., Терешина Е.Н. Системы предварительного напряжения железобетонных конструкций без сцепления арматуры с бетоном и со сцеплением в монолитном строительстве // ЖБИ и Конструкций. Москва: 2016, – № 4. С. 14-15.

13. Гавриленко А.А., Баркая Т.Р., Субботин С.Л. Испытания до разрушения железобетонных балок, напряженных арматурой без сцепления // Современные вопросы устойчивости, пластичности и ползучести в механике деформируемого твердого тела: Сборник научных трудов, посвященный 90-летию заслуженного деятеля науки и техники РФ, доктора технических наук, профессора Владимира Георгиевича Зубчанинова / Под общей редакцией В.И. Гулятьева. Том Часть 1. Тверь: Тверской государственный технический университет, 2020. С. 87-94.

References

1. Bajkov V.N., Sigalov E`E. Zhelezobetonny`e konstrukcii: Obshhij kurs: Ucheb. dlya vuzov. 5-e izd., pererab. i dop [Reinforced concrete structures:

General course: Textbook for universities – 5th ed., revised and add]. Moskva: Strojizdat, 1991. p. 767.

2. Murashev V.I. Treshhinoustojchivost', zhestkost' i prochnost' zhelezobetona [Crack resistance, rigidity and strength of reinforced concrete]. Moskva: Strojizdat, 1950. p. 114.

3. Zalesov A.S., Kody'sh E'.N., Lemy'sh L.L., Nikitin I.K. Raschyot zhelezobetonny'x konstrukcij po prochnosti, treshhinostojkosti i deformacijam [Calculation of reinforced concrete structures in terms of strength, crack resistance and deformations]. Moskva: Strojizdat, 1988. p. 320.

4. Topilin A.N., Verkeenko M.A., Varlamova A.D. Moskva: Components of Scientific and Technological Progress, 2023. №4(82). Pp. 12-22.

5. Topilin A.N. Texnologiya tekstil'noj promy'shennosti. Moskva: 2019, №5 (383). Pp. 233-237.

6. Topilin A.N., Verkeenko M.A., Varlamova A.D. XXVI International Scientific Conference «Construction the Formation of Living Environment» (FORM-2023), Reliability of Buildings and Constructions, 2023. Pp. 1-6.

7. Metodicheskoe posobie «Konstrukcii zhelezobetonny'e monolitny'e s napryagaemoj armaturoj bez scepleniya s betonom. Pravila proektirovaniya». [Methodical manual «Monolithic reinforced concrete structures with tensioned reinforcement without adhesion to concrete. Design rules»]. Moskva: Minstroj, 2017 – p. 109.

8. Topilin A.N., Gneushev I.I., Luchkin E.A., Keo U. Innovacii i investicii. Moskva: 2021, №3. Pp. 244-248.

9. Pasternak P.L. Proektirovaniya zhelezobetonny'x konstrukcij [Designing reinforced concrete structures]. Moskva: Strojizdat, 1966g. p. 380.

10. Vajsfel'd A.A. Issledovanie napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya normal'ny'x sechenij izgibaemy'x zhelezobetonny'x e'lementov pri chastichnom ili polnom otsutstvii scepleniya armatury` s betonom: diss. kand. texn. nauk

[Investigation of the stress-strain state of normal sections of bent reinforced concrete elements with partial or complete absence of reinforcement adhesion to concrete: dissertation of the Cand. Tech. Sciences]. Vladivostok: 1982. p. 193.

11. Obrazczov L.V. Issledovanie zhelezobetonny`x predvaritel`no napryazhenny`x balok bez scepheniya armatury` s betonom na dejstvie izgibayushhego momenta i poperechnoj sily`: diss. kand. texn. Nauk [Investigation of reinforced concrete prestressed beams without reinforcement coupling to concrete on the effect of bending moment and transverse force. Dissertation of the Cand. Tech. Sciences]. Brest: 1980. p. 150.

12. Topilin A.N., Badaev M.I., Keo U., Tereshina E.N. ZhBI i Konstrukcij. Moskva: 2016, № 4. Pp. 14-15.

13. Gavrilenko A.A., Barkaya T.R., Subbotin S.L. Sovremenny`e voprosy` ustojchivosti, plastichnosti i polzuchesti v mexanike deformiruемого твердого tela: Sbornik nauchny`x trudov, posvyashhenny`j 90-letiyu zaslužennogo deyatelya nauki i texniki RF, doktora texnicheskix nauk, professora Vladimira Georgievicha Zubchaninova. Pod obshhej redakciej V.I. Gul`tyaeva. Tom Chast` 1. Tver`: Tverskoj gosudarstvenny`j texnicheskij universitet, 2020. Pp. 87-94.

Авторы согласны на обработку и хранение персональных данных.

Дата поступления: 4.12.2025

Дата публикации: 28.02.2026