

ТРАНСПОРТ

УДК 656.05

Н. Н. Дудникова, канд. техн. наук, Д. Д. Просин

**Автомобильно-дорожный институт (филиал)
федерального государственного бюджетного образовательного учреждения
высшего образования «Донецкий национальный технический университет»
в г. Горловка**

АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ ПРИНЦИПОВ И МЕТОДИК РАСЧЕТА ЦИКЛОВ, ПРОМЕЖУТОЧНЫХ ТАКТОВ ФАЗ СВЕТОФОРНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ДОРОЖНОГО ДВИЖЕНИЯ

Выполнен анализ существующих принципов и методик расчета циклов, промежуточных тактов фаз светофорного регулирования дорожного движения.

Выявлены основные недостатки методик с точки зрения особенностей расчета промежуточных тактов фаз светофорного регулирования, не дающие возможность обеспечить надлежащий уровень безопасности дорожного движения.

Ключевые слова: дорожное движение, светофорное регулирование, цикл регулирования, промежуточный такт, метод расчета

Постановка проблемы

Дорожное движение – это сложная динамическая система с точки зрения многофакторных случаев формирования процесса движения как каждой транспортной единицы, так и сформированного транспортного потока [1]. Оно осуществляется в условиях значительной неопределенности, которая усложняется появлением все большего числа транспортных средств на неготовых для их пропуска дорогах.

Обеспечение беспрерывного и скоростного движения транспортных потоков, рассчитанных на продолжительную перспективу, обязывает реализовывать рациональную организацию пропуска транспортных средств, которая дает возможность исключать дорожно-транспортные происшествия, заторы, сверхнормативные задержки на пересечениях; применять технические средства организации дорожного движения.

Используемая на 40–45 % пропускная способность проезжих частей дорожной сети в городах и других населенных пунктах за счет поочередного пропуска транспортных потоков на часто расположенных пересечениях улиц прямо пропорционально повышает плотность, задержки и обратно пропорционально снижает скорость сообщения и соответствующие экономические показатели подвижного состава [2].

Критерии введения светофорной сигнализации, построенные на эмпирических предпосылках, не всегда способствуют повышению эффективности управления и обеспечению безопасности дорожного движения.

Подобные проблемы имеют место и в государствах с развитым промышленно-техническим потенциалом, где они компенсируются, в большинстве случаев, разделением потоков в пространстве [2]. К решению таких проблем привлечены не только научные учреждения, но и вузы.

Анализ последних исследований и публикаций

Вопросы, связанные с организацией дорожного движения на регулируемых пересечениях, отражены в работах М. Б. Афанасьева, Г. И. Клинковштейна, В. И. Коноплянко, Ю. А. Кременца, Е. М. Лобанова и др. [1–11].

Цель исследования – анализ существующих принципов и методик расчета циклов, промежуточных тактов фаз светофорного регулирования дорожного движения.

Изложение основного материала исследования

Наилучшие условия пропуска потоков на пересечении, с точки зрения минимума задержек и максимума безопасности движения, создаются развязкой в разных уровнях [3]. Однако это дорогой способ. Он связан, как правило, с перестройкой всей транспортной системы, сносом домов, возведением искусственных сооружений, что требует значительных капитальных затрат. Более распространенный способ – это разделение потоков в пространстве за счет создания пересечений с круговым движением, канализирование, что требует строительства дополнительных полос проезжих частей – расширения дорог с применением островков безопасности и т. д., а также разделение потоков во времени, при котором очередьность пропуска транспортных средств связана с соответствующими задержками на подходах к пересечению за счет движения транспортных потоков на конфликтных направлениях. Кроме того, применяемые методы расчета режимов светофорного регулирования, построенные на эмпирических предпосылках, при проектировании светофорных объектов дают нерациональные продолжительности тактов, что увеличивает задержки транспортных средств и уменьшает скорости сообщения.

Существующие методы определения продолжительности циклов светофора строятся лишь на базе оценки задержек или данных по обеспечению разъезда полной очереди транспортных средств, которая образовалась у соответствующей стоп-линии.

Зарубежный опыт необходимо начать анализировать с работы американских специалистов Т. М. Метсона и У. С. Смита описанной в [4], которые предложили формулу определения продолжительности цикла, построенную на задержках:

$$T_u = 3600 \frac{\sum_{k=1}^n K_k}{3600 - \sum_{k=1}^n V_k \cdot D_k} = \frac{34200}{3600 - (V_1 + V_2) \cdot 2,1}, \quad (1)$$

где $K_k = 4,75$ – дополнительная задержка каждого транспортного средства, которое стояло в очереди на запрещающий сигнал, возникшая от приведения очереди в движение, с [4];

$D_k = 2,1$ – интервал сдвига с места транспортного средства, с [4];

n – количество фаз в цикле, ед.;

V_1, V_2 – интенсивность движения на направлениях, пересекающихся на пересечении, авт/ч.

Формула (1) не нашла применения на практике, так как в ней не принимаются во внимание некоторые исходные параметры движения на пересечении, а величина K_k характеризует размер дополнительных задержек без учета основных. В результате образуются заторы в движении или неоправданые лишние задержки. Такие факторы, как геометрические размеры пересечения и основные характеристики транспортных потоков [5] не учтены. Интервал сдвига транспортного средства с места D_k рекомендован одинаковым для всех случаев – 2,1 с, хотя в действительности он зависит от динамических качеств транспортных средств, квалификации, скорости реакции, внимательности, сосредоточенности на управлении автомобилем водителей, условий движения и типа маневра [2].

Кроме того, формула не учитывает исходные параметры пешеходного движения на пересечении, что является довольно важным упрощением в технологии пропуска транспортных потоков. Формула (1) не предусматривает учета необходимости наличия промежуточных тактов в светофорном регулировании для освобождения площади пересечения после соответствующей фазы разъезда.

Существенные зарубежные разработки относительно необходимости учета и соответствующего определения промежуточных тактов предложил Ф. В. Вебстер [2]. Его методика их определения заключается в том, что суммарное потерянное время в цикле при движении транспортных средств через пересечение рассчитывается по формуле:

$$L = \sum_{i=1}^n t'_i, \quad (2)$$

где L – суммарное потерянное время в цикле при движении транспортных средств, с; t'_i – продолжительность i -го промежуточного такта, с;

n – количество промежуточных тактов, ед.

Продолжительность i -го промежуточного такта рассчитываем по [2]:

$$t'_i = \tau_1 + \tau_2 - \tau_3 + 2, \quad (3)$$

где τ_1 – время проезда (без снижения скорости) расстояния до стоп-линии, равного тормозному пути, с:

$$\tau_1 = \frac{V_a}{2 \cdot 3,6 \cdot a^0}, \quad (4)$$

где V_a – скорость транспортных средств на подходе к пересечению, км/ч;

a^0 – замедление движения транспортных средств, принимается равным 3, м/с [2];

τ_2 – время проезда расстояния от стоп-линии к самой дальней конфликтной точке с добавлением временной длины транспортного средства, с:

$$\tau_2 = \frac{(l_j + l_a) \cdot 3,6}{V_a}, \quad (5)$$

где l_j – расстояние от стоп-линии до самой крайней конфликтной точки, м; (определяется на пересечении);

l_a – габаритная длина транспортных средств, принимается равной в среднем 6 м;

τ_3 – время с момента включения зеленого такта в очередной фазе к моменту прибытия к дальней конфликтной точке, с [2]:

$$\tau_3 = \sqrt{\frac{2l}{a}}. \quad (6)$$

Здесь же Ф. В. Вебстер рекомендует в расчете продолжительности промежуточного такта для поворачивающегося налево движения скорость принимать равной 25 км/ч [2].

Как видим, для определения продолжительности промежуточного такта по формуле (3), которая является составной величиной формулы (2), необходимо установить:

- время проезда расстояния до стоп-линий, равное тормозному пути, который зависит от скорости транспортного средства и коэффициента сцепления дороги, а также от интенсивности торможения;

- время занятости пересечения от стоп-линий до дальнего ряда пешеходного перехода, которое также зависит от скорости движения транспортного средства и других факторов;

- временной интервал движения транспортного средства на расстоянии от стоп-линий к дальней конфликтной точке при основном такте светофорного регулирования в очередной фазе с прибавлением к $\tau_1 + \tau_2 + \tau_3$ двух секунд.

Метод является не только эмпирическим, но и громоздким по применению, тогда как параметр t'_i можно получить при натурных наблюдениях путем измерения времени занятости транспортными средствами пересечения при его проезде. Погрешность находится в обратно пропорциональной зависимости от объема выборки, т. е. от количества измерений, а последний расчетный параметр находится в линейной зависимости от избранной точности измерения исходного параметра.

Обобщая зарубежную практику [2, 6, 7] расчета длительностей циклов светофорного регулирования в зависимости от размеров временных интервалов между передними бамперами транспортных средств при пересечении ими стоп-линий (рисунок), можно сделать вывод, что между продолжительностью цикла, длительностью промежуточных тактов и размерами пересечений, временных интервалов между транспортными средствами существует прямо пропорциональная зависимость или зависимость, близкая к ней. По методу Т. М. Метсона продолжительность цикла находится в зависимости лишь от размеров пересечения и соответствующих промежуточных тактов.

Назначение промежуточного такта состоит в обеспечении временной возможности для освобождения зоны пересечения не только теми транспортными средствами, которые были на ней во время горения желтого сигнала, но и теми, которые в последнюю секунду горения зеленого сигнала пересекали стоп-линию и не имели возможности остановиться перед ней своевременно. Однако транспортные средства, водители которых заметили этот сигнал на достаточном расстоянии для остановки перед стоп-линией, обязаны остановиться и ждать разрешающего такта. Водителям транспортных средств, остановленных у стоп-линии при включении желтого сигнала после запрещающего такта, необходимо подготовиться к началу движения и начать движение с включением основного такта.

Обращает на себя внимание тот факт, что продолжительности промежуточных тактов не рассчитываются по формулам с учетом динамики транспортных средств, геометрических параметров пересечений и условий движения, поскольку теоретические разработки по выводу таких формул отсутствуют. Ошибочно считают, что промежуточные такты – это лишь границы основных фаз и при проезде пересечения никакого значения не имеют, и служат даже причиной значительных задержек и т. д. Их продолжительности рекомендуются противоречиво и необоснованно: 3–7 с, 3–5 с [8].

Например, для освобождения пересечения трамваем, если он начал движение после остановки перед пересечением, потребуется не менее 7–16 с [8] в зависимости от геометрических параметров пересечения и других факторов. При продолжительности промежуточных тактов менее той, что отвечает геометрическим параметрам пересечения и динамике транспортных средств, создаются аварийные ситуации, при значительных отклонениях возникают неоправданные задержки автомобилей у стоп-линий, которые вызывают нервозность водителей, что снижает пропускную способность и безопасность движения на регулируемых пересечениях.

Зависимость продолжительности циклов светофора от геометрических параметров пересечений и, соответственно, от длительности промежуточных тактов показана на рисунке. Зарубежные исследователи [9] пытаются промежуточные такты в цикле отменить, соответственно увеличив продолжительность основных тактов, оправдывая это усилением контрастности «горения» сигналов.

Исследования отдельных элементов пересечения или проездных частей одного направления без учета динамики образования очереди и ее разъезда, выполняемых маневров и конфликтных ситуаций при этом, а также освобождение зоны пересечения от транспортных средств на всех подходах к нему и на нем в единицу времени, не позволяет правильно описать динамику движения транспортных потоков.

Метод расчета промежуточного такта, предложенный Вебстером, построенный на измерениях скоростей движения в зоне пересечения и на подходах к нему, расчетах, которые

составляют модель параметров, и прибавлении к ним двух секунд, которые отражают его эмпирическую направленность и также не отражают сформированной практики проезда пересечения в вероятностном плане. Тангенс угла наклона линии W–W по Вебстеру больше, чем у линии A–A по методу, предложенному Живоглядовым, за счет увеличения суммарной продолжительности промежуточных тактов на 50 % и прибавления к ней еще пяти секунд.

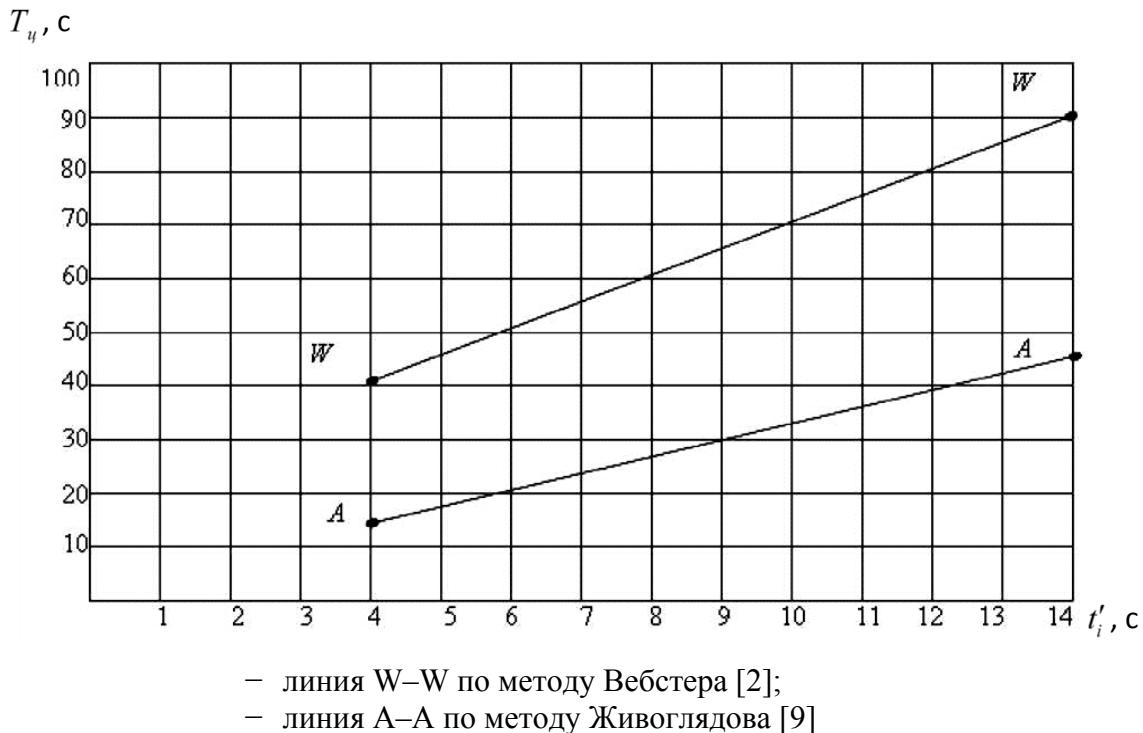


Рисунок – Зависимость продолжительности циклов T_u , с, работы светофоров

от суммарной продолжительности промежуточных тактов t'_i при временном интервале движения 2 с на транспортное средство, от интенсивности движения 0,166 авт/с

На основании вышеперечисленного можно сделать вывод, что между продолжительностью цикла и суммарной величиной промежуточных тактов желтых сигналов существует линейная зависимость, которая отражает геометрические параметры пересечения.

Продолжительности цикла светофора, посчитанные по методам Вебстера и Живоглядова приведены в таблице.

Современные методики определения параметров промежуточных тактов предусматривают использование методики Ю. А. Кременца [2], в которой рассчитывается время прямолинейного движения транспортного средства через площадь пересечения с учетом пути торможения перед стоп-линией. Расчет указанного времени проводят по формуле [2]:

$$t_{ni} = t_p + \frac{V_k}{2a} + \frac{B_i + L_a}{V_k}, \quad (7)$$

где t_p – время реакции водителя, с;

V_k – рассчитанная скорость движения через площадь пересечения, м/с;

a – замедление транспортного средства;

B_i – ширина площади пересечения между стоп-линиями, м;

L_a – длина приведенного автомобиля, м.

Зависимость (7) предусматривает учет двух маневров транспортного средства: торможение до полной остановки перед стоп-линией и проезд площади пересечения прямолинейно.

Таблица – Зависимость продолжительности цикла светофора от размеров промежуточных тактов и геометрических параметров пересечений по методам Вебстера и Живоглядова

Суммарная продолжительность промежуточных тактов $L = \sum_{i=1}^n t'_i$, с	Интенсивность движения, λ_j , авт/ч, авт/с	Часть основного такта, $\alpha = \beta =$ $= 0,5$	Времен- ной интервал, τ_j , с/авт.	Поток насыщения, M_n	Фазовый коэффициент, y_i	Длительность цикла	
						Метод Вебстера	Метод Живоглядова
4	600 0,1666	0,5	2	0,465	0,358	38,9	15
6	600 0,1666	0,5	2	0,465	0,358	49,5	21
8	600 0,1666	0,5	2	0,465	0,358	60	27
10	600 0,1666	0,5	2	0,465	0,358	70,7	33
12	600 0,1666	0,5	2	0,465	0,358	81,3	39
14	600 0,1666	0,5	2	0,465	0,358	91,9	45

В зависимости (7) прибавление времени реакции водителя и времени торможения равно времени остановки транспортного средства перед стоп-линией. Последняя составляющая зависимости раскрывает время на движение транспортного средства через площадь пересечения.

Проведенный детальный анализ зависимости (7) выявил ряд недостатков в определении времени промежуточных тактов:

- не учитываются все разрешенные направления движения в предыдущей фазе регулирования;
- не определяется время на промежуточный такт по всем маневрам движения, кроме прямолинейного движения через площадь пересечения;
- отсутствуют конкретные рекомендации определения расчетной скорости движения через площадь пересечения;
- отсутствуют конкретные рекомендации определения ускорения транспортного средства при выполнении им маневра остановки перед стоп-линией.

Выходы

В статье выяснено, что в настоящее время существует несколько методик определения промежуточного такта светофорного регулирования. Методики, основывающиеся на эмпирических исследованиях и не позволяют провести объективные расчеты, так как имеют ограничение – привязку к результатам непосредственного исследования, ко времени исследования и соответствующим условиям. Более объективные методики, разрешают проводить обобщенные расчеты, но имеют недостатки: не учитываются разрешенные направления движения в предыдущей фазе регулирования, не учитываются соответствующие маневры, которые были разрешены в предыдущей фазе, отсутствуют рекомендации определения расчетной скорости движения через площадь пересечения, отсутствуют рекомендации относи-

тельно принятия решения к интенсивности торможения перед стоп-линией.

Таким образом, решение задач обеспечения надлежащего уровня безопасности дорожного движения в области светофорных объектов невозможно без соответствующей организации промежуточного такта светофорного регулирования.

Список литературы

1. Организация дорожного движения / В. А. Гавриков, С. А. Анохин, А. А. Гуськов, Н. Ю. Залукаева. – Тамбов : Тамбовский государственный технический университет ; ЭБС АСВ, 2020. – 144 с. – ISBN 978-5-8265-2259-2.
2. Кременец, Ю. А. Технические средства организации дорожного движения / Ю. А. Кременец, М. П. Печерский, М. Б. Афанасьев. – Москва : Академкнига, 2005. – 279 с. – ISBN 5-94628-111-9.
3. Ярков, С. А. Повышение эффективности организации дорожного движения в городах : монография / С. А. Ярков, В. В. Морозов. – Тюмень : Тюменский индустриальный университет, 2020. – 161 с. – ISBN 978-5-9961-2291-2.
4. Клинковштейн, Г. И. Организация дорожного движения / Г. И. Клинковштейн, М. Б. Афанасьев. – 5-е изд., перераб. и доп. – Москва : Транспорт, 2001. – 247 с. – ISBN 5-277-02240-6.
5. Коноплянко, В. И. Организация и безопасность дорожного движения / В. И. Коноплянко. – Москва : Высшая школа, 2007. – 200 с. – ISBN 978-5-06-005549-8.
6. Власов, А. А. Теория транспортных потоков : монография / А. А. Власов. – Пенза : ПГУАС, 2014. – 124 с. – ISBN 978-5-9282-1173-8.
7. Петров, В. В. Теория управления движением транспортных потоков в городах / В. В. Петров. – 2-е изд. стереотип. – Омск : СибАДИ, 2020. – 101 с.
8. Лобанов, Е. М. Транспортная планировка городов / Е. М. Лобанов. – Москва : Транспорт, 1990. – 240 с. – ISBN 5-277-00375-4.
9. Живоглядов, В. Г. Теория движения транспортных и пешеходных потоков : монография / В. Г. Живоглядов. – Ростов-на-Дону : Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки, 2005. – 1082 с. – ISSN 0321-2653.
10. Дудников, А. Н. Теоретические основы учета колебаний плотности транспортных потоков при двухфазном светофорном регулировании / А. Н. Дудников, Н. Н. Дудникова, О. И. Карапцук. – Текст : электронный // Инновационные технологии в машиностроении, образовании и экономике / Донской государственный технический университет. – Азов, 2020. – Т. 28, № 3(17). – С. 66–74. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44483642> (дата обращения: 11.08.2025).
11. Дудников, А. Н. Теоретические основы учета колебаний интенсивности движения транспортных и пешеходных потоков при двухфазном светофорном регулировании / А. Н. Дудников, Н. Н. Дудникова, Э. Г. Варданян. – Текст : электронный // Инновационные технологии в машиностроении, образовании и экономике / Донской государственный технический университет. – Азов, 2019. – Т. 24, № 3(13). – С. 20–31. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=bfhejy> (дата обращения: 11.08.2025).

Н. Н. Дудникова, Д. Д. Просин

Автомобильно-дорожный институт (филиал)

**федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования
«Донецкий национальный технический университет» в г. Горловка**

**Анализ существующих принципов и методик расчета циклов, промежуточных тактов фаз
светофорного регулирования дорожного движения**

Обеспечение беспрерывного и скоростного движения транспортных потоков, рассчитанных на продолжительную перспективу, вменяет в обязанность это реализовывать рациональной организацией пропуска транспортных средств, что исключает дорожно-транспортные происшествия, затормаживания, сверхнормативные задержки на пересечениях, применением технических средств организации дорожного движения.

Выяснено, что в настоящее время существует несколько методик определения промежуточного такта светофорного регулирования. Методики, основывающиеся на эмпирических исследованиях и не позволяют провести объективные расчеты, так как имеют ограничение – привязку к результатам непосредственного исследования, ко времени исследования и соответствующим условиям. Более объективные методики, разрешают проводить обобщенные расчеты, но имеют недостатки: не учитываются разрешенные направления движения в предыдущей фазе регулирования, не учитываются соответствующие маневры, которые были разрешены в предыдущей фазе, отсутствуют рекомендации определения расчетной скорости движения через площадь пересечения, отсутствуют рекомендации относительно принятия решения к интенсивности торможения перед стоп-линией.

Таким образом, решение задач обеспечения надлежащего уровня безопасности дорожного движения в области светофорных объектов невозможно без соответствующей организации промежуточного такта светофорного регулирования.

ДОРОЖНОЕ ДВИЖЕНИЕ, СВЕТОФОРНОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ, ЦИКЛ РЕГУЛИРОВАНИЯ, ПРОМЕЖУТОЧНЫЙ ТАКТ, МЕТОД РАСЧЕТА

N. N. Dudnikova, D. D. Prosin

**Automobile and Road Institute (Branch) of the Federal State Budget Educational Institution
of Higher Education «Donetsk National Technical University» in Gorlovka**

Analysis of Existing Principles and Methods for Calculating Cycles, Intermediate Stages of Traffic Light Control Phases

Ensuring continuous and high-speed movement of traffic flows, designed for the long term, requires rational organization of the passage of vehicles, which eliminates traffic accidents, congestion, excessive delays at intersections, using technical means of traffic organization.

The article has found that today there are several methods for determining the intermediate cycle of traffic light regulation. Methods based on the empirical research do not allow for objective calculations, since they have a limitation – a link to the results of direct research to the time of research and relevant conditions. More objective methods allow for generalized calculations, but have disadvantages in the form of not taking into account the permitted directions of movement in the previous phase of regulation, the corresponding maneuvers that were permitted in the previous phase are not taken into account, there are no recommendations for determining the estimated speed of movement through the intersection area, there are no recommendations regarding the decision on the intensity of braking before the stop line.

Thus, the solution to the problem of ensuring an appropriate level of road safety in the area of traffic light objects is impossible without the appropriate organization of the intermediate stage of traffic light regulation.

ROAD TRAFFIC, TRAFFIC LIGHT CONTROL, CONTROL CYCLE, INTERMEDIATE TACT, CALCULATION METHOD

Сведения об авторах:

Н. Н. Дудникова

SPIN-код РИНЦ: 1424-1363

Телефон: +7 949 412-79-04

Эл. почта: DudnikovaNN@rambler.ru

Д. Д. Просин

Телефон: +7 949 412-79-04

Статья поступила 19.08.2025

© Н. Н. Дудникова, Д. Д. Просин, 2025

*Рецензент: Т. А. Самисько, канд. техн. наук, доц.,
Автомобильно-дорожный институт
(филиал) ДонНТУ в г. Горловка*