

УДК 656.11

А. Н. СТАРОВОЙТОВ, кандидат физико-математических наук, Б. ШАПОВАЛОВА, магистрант, Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

УСТАНОВЛЕНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ИЗМЕНЕНИЯ ИНТЕНСИВНОСТИ ТРАНСПОРТНЫХ ПОТОКОВ

Интенсивность движения транспортного потока – одна из основных его характеристик, которую необходимо знать для реализации управленческих воздействий. Этот факт определяет актуальность задачи выявления закономерностей изменения интенсивности транспортных потоков во времени. В статье проведен анализ изменения приведенной интенсивности транспортных потоков на перекрестке. В качестве исходных данных были взяты данные камеры наружного наблюдения на пересечении улицы Интернациональной и проспекта Ленина в городе Гомеле. По результатам указанного анализа были выделены три промежутка времени с различными закономерностями в изменении интенсивности транспортных потоков. Установлено, что в утренние часы интенсивность транспортных потоков квадратично возрастает, в дневные часы приведенная интенсивность относительно постоянна, а в вечерние часы – линейно убывает. Для каждого промежутка времени построены статистические модели, установлена их адекватность.

Современные транспортные проблемы городов в основном обусловлены перегрузкой транспортных сетей чрезмерными объемами движения. Уже много лет темпы роста количества автомобилей в городах превышают темпы развития транспортных сетей. Все возрастающая роль автомобильного транспорта в жизни общества требует создания необходимых условий для обеспечения удобства и безопасности транспортного процесса. Рост объема перевозок ведет к увеличению интенсивности движения, что в условиях городов с исторически сложившейся застройкой приводит к возникновению транспортных проблем. Следствием обострения таких проблем является уменьшение показателей эффективности и безопасности дорожного движения. Наиболее существенные задачи, обостряющиеся по мере роста уровня автомобилизации, – прогнозирование интенсивности движения на городских магистралях, обеспечение пропускной способности отдельных элементов и всей улично-дорожной сети города, размещение автомобилей на территории города для хранения, снижение воздействия автомобильного транспорта на окружающую среду. Чрезмерный уровень загрузки дорог движением вызывает уменьшение скорости транспортных потоков, увеличение времени сообщения, задержек движения и т. д. Поэтому исследование закономерностей изменения объемов дорожного движения в городах является актуальной задачей.

Сегодня для сбора данных о параметрах транспортного потока применяются транспортные детекторы различного типа: контактного, фотоэлектрического, ультразвукового, магнитного и т. д. [1].

Исследование интенсивности движения проводилось на пересечении улицы Интернациональной и проспекта Ленина в городе Гомеле (рисунок 1). Значения интенсивностей были собраны путём обработки видеозаписей за 14 часов в течение одних суток 19 октября 2015 года (с 7 до 21 часов).

Интенсивность движения фиксировалась по циклам для каждого входа. При расчетах интенсивности движения для различных типов транспортных средств была принята расчетная единица, приведенная к легковому автомобилю (привед. ед/ч), с учетом коэффициентов приведения согласно ТКП 45-3.03-227-2010 “Улицы населенных пунктов” [2].

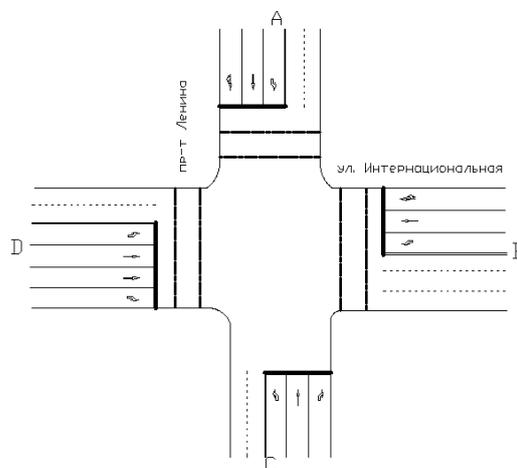


Рисунок 1 – Схема перекрестка

Приведенное число транспортных средств $N^{прив}$ находится по формуле

$$N^{прив} = \sum_{i=1}^n N_i \cdot K_i^{прив}, \quad (1)$$

где N_i – интенсивность движения автомобилей i -го типа; $K_i^{прив}$ – коэффициент приведения для автомобиля i -го типа; n – число типов автомобилей.

На рисунке 2 представлен график изменения приведенной интенсивности с течением времени для входа В.

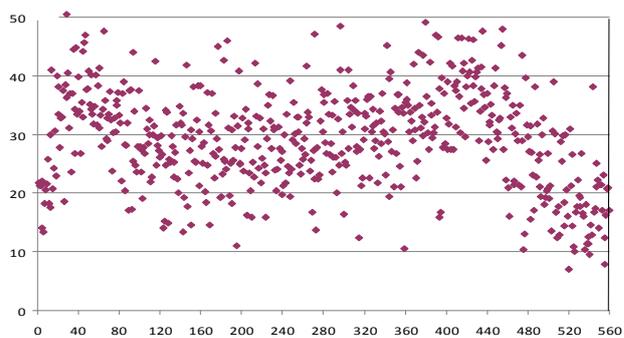


Рисунок 2 – Динамика изменения приведенной интенсивности с течением времени для входа В

Для входов *A*, *C* и *D* графики изменения приведенной интенсивности имеют аналогичный вид.

Анализ указанных графиков показывает, что приведенная интенсивность движения в течение с 7:00 до 21:00 имеет закономерность возрастать в утренние часы, после чего она относительно постоянна до некоторого вечернего времени, начиная с которого, убывает. Доказательством этого факта может служить статистическая проверка приведенной интенсивности на случайность (наличие тренда). Для проведения указанной проверки будем использовать следующие статистические критерии: серий, «нисходящих» и «восходящих» серий и автокорреляции [3, 4]. Результаты применения указанных критериев приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты проверки приведенной интенсивности на случайность

Критерии	Вход			
	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>D</i>
Серий	3,115*	4,7498	2,72726	4,29396
	0,002**	0,000	0,00639	0,00002
«Нисходящих» и «восходящих» серий	0,653	0,75289	1,15443	0,15058
	0,514	0,4515	0,24832	0,8803
Автокорреляции	241,657	1129,09	251,523	808,427
	0,00	0,00	0,00	0,00
* Значение критерия.				
** Достижимый уровень значимости.				

Из таблицы 1 видно, что для каждого входа существуют критерии, для которых значение достигаемого уровня значимости меньше, чем заданный уровень 0,05. Поэтому гипотеза о случайности приведенной интенсивности отклоняется, т.е. в изменении приведенной интенсивности есть закономерность.

Разобьем рассматриваемый интервал на три промежутка: 1) до 9 часов (до 79-й точки включительно); 2) с 9 до 17 часов (до 400-й точки включительно); 3) с 17 часов.

Исследуем приведенную интенсивность в промежутке времени с 9:00 до 17:00. На рисунке 3 представлен график изменения приведенной интенсивности в промежутке с 9 до 17 часов для входа *A*. Для входов *B*, *C* и *D* такие графики имеют аналогичный вид.

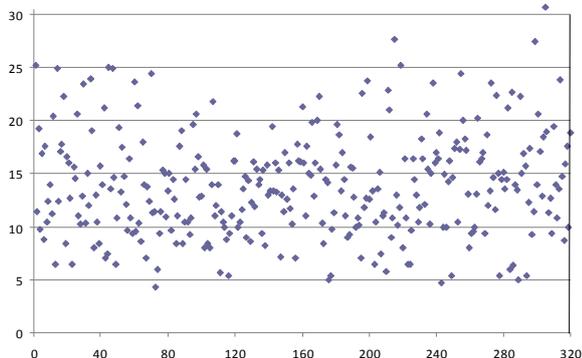


Рисунок 3 – Динамика изменения приведенной интенсивности с течением времени для входа *A* в промежутке с 9:00 до 17:00

Анализ приведенной интенсивности движения для каждого входа в промежутке времени с 9:00 до 17:00 показывает, что она в указанном промежутке времени может быть описана моделью случайная выборка [5]. Проверим это с помощью вышеупомянутых критериев.

Результаты приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Результаты проверки приведенной интенсивности в промежутке с 9:00 до 17:00 на случайность

Критерии	Вход			
	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>D</i>
Серий	0,6789*	1,28776	0,1685	0,05546
	0,497**	0,19783	0,86619	0,95577
«Нисходящих» и «восходящих» серий	0,95138	0,15488	0,28763	1,03988
	0,34141	0,87691	0,77363	0,29839
Автокорреляции	24,0784	54,7019	30,5216	8,75638
	0,45712	0,00034	0,16806	0,99807
* Значение критерия.				
** Достижимый уровень значимости.				

Из таблицы 2 видно, что для каждого входа значение достигаемого уровня значимости больше, чем заданный уровень 0,05, за исключением критерия автокорреляции для входа *B*. Поэтому гипотеза о случайности приведенной интенсивности в рассматриваемый промежуток времени не отклоняется на уровне значимости 0,05.

Таким образом, для краткого описания приведенной интенсивности достаточно использовать основные числовые характеристики (таблица 3).

Таблица 3 – Основные числовые характеристики приведенной интенсивности в промежутке с 9:00 до 17:00

Основные числовые характеристики	Вход			
	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>D</i>
Объем выборки	321	321	321	321
Математическое ожидание	13,9103	29,2505	17,7888	16,3841
Медиана	13,6	29,2	17,8	16,0
Дисперсия	23,3946	50,7944	31,6186	26,1833
Среднее квадратическое отклонение	4,8368	7,12702	5,62304	5,11697
Коэффициент вариации, %	34,7714	24,3655	31,61	31,2313
Минимум	4,3	10,6	3,3	1,0
Максимум	30,6	49,1	30,9	29,3

Распределения значений приведенной интенсивности для каждого входа носят в основном симметричный характер, близкий к нормальному закону распределения. Этого следовало ожидать, поскольку приведенная интенсивность есть сумма некоторого числа слагаемых. Гистограммы приведенной интенсивности показывают, что распределения имеют характерный максимум, как правило, совпадающий со средним значением или близкий к нему.

С помощью критериев χ^2 -Пирсона и Шапиро – Уилка проверим гипотезы о нормальном законе распределения приведенной интенсивности. Результаты приведены в таблице 4.

Таблица 4 – Результаты проверки приведенной интенсивности на нормальный закон распределения

Критерии	Вход			
	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>D</i>
χ^2 -Пирсона	53,199*	29,9969	22,421	6,20187
	0,025**	0,70827	0,95074	0,18457
Шапиро – Уилка	0,967	0,9814	0,97694	0,97994
	0,00014	0,27543	0,05596	0,17671
* Значение критерия.				
** Достижимый уровень значимости.				

Для входа *A* значение достигаемого уровня значимости хотя бы для одного критерия меньше, чем заданный уровень 0,05, и, следовательно, гипотеза о нормальном распределении приведенной интенсивности отклоняется на уровне значимости 0,05. Для входов *B*, *C* и *D* значение достигаемого уровня значимости для обоих критериев больше, чем заданный уровень 0,05, и, следовательно, гипотеза о нормальном распределении приведенной интенсивности не противоречит экспериментальным данным.

Приведенная интенсивность для входа *A* описывается гамма-распределением (значение критерия $\chi^2 = 1,67$, число степеней свободы $\nu = 4$, достигаемый уровень значимости $P\text{-Value} = 0,7955$).

Гистограмма приведенной интенсивности для входа *A* с нанесенным графиком функции плотности гамма-распределения приведена на рисунке 4. На рисунке 5 изображена гистограмма приведенной интенсивности для входа *B* с нанесенным графиком функции плотности нормального распределения. Для входов *C* и *D* гистограммы имеют вид, аналогичный рисунку 5.

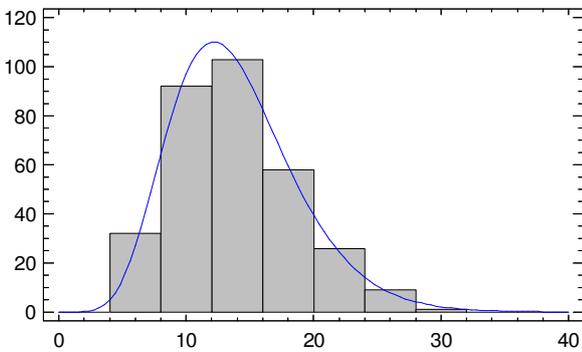


Рисунок 4 – Гистограмма приведенной интенсивности для входа *A* и функция плотности гамма-распределения

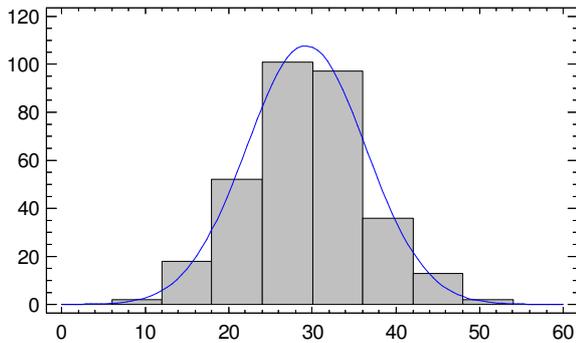


Рисунок 5 – Гистограмма приведенной интенсивности для входа *B* и функция плотности нормального распределения

Исследуем приведенную интенсивность в промежутке времени с 7:00 до 9:00.

График изменения приведенной интенсивности для входа *C* в промежутке времени с 7:00 до 9:00 представлен на рисунке 6. Для входов *A*, *B*, и *D* такие графики имеют аналогичный вид.

Вид рисунка 6 показывает, что приведенная интенсивность движения в промежутке с 7:00 до 9:00 имеет тенденцию возрастать до некоторого момента времени, а затем идет на спад.

Рассматривая приведенную интенсивность в промежутке времени с 7:00 до 9:00 как временной ряд, поста-

вим задачу выделить детерминированную составляющую – тренд. Проверка гипотезы о наличии тренда показала, что для каждого входа приведенная интенсивность в промежутке с 7:00 до 9:00 не является случайной. Это говорит о том, что данный показатель имеет тренд. Будем использовать параметрические методы выделения тренда [5].

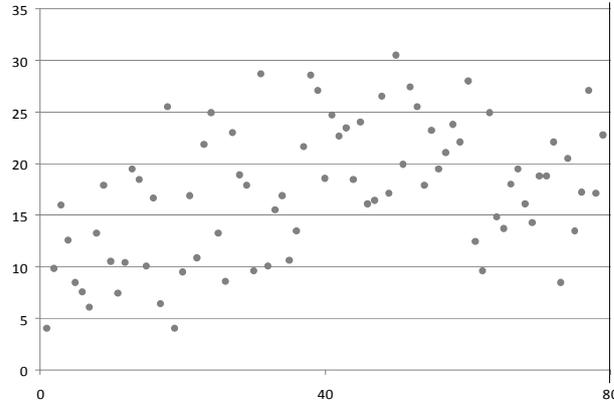


Рисунок 6 – Динамика изменения приведенной интенсивности с течением времени для входа *C* в промежутке с 7:00 до 9:00

Методом наименьших квадратов оценим несколько моделей тренда (линейную, квадратическую, экспоненциальную и др.). На основании характеристик точности аппроксимации наблюдаемых значений временного ряда (RMSE – среднеквадратическая ошибка, MAE – средняя абсолютная ошибка и т.д.) получили, что для каждого входа наилучшей моделью является квадратическая модель

$$N_t^{\text{прив}} = \beta_0 + \beta_1 t + \beta_2 t^2 + \varepsilon_t, \quad (2)$$

где β_0 , β_1 , β_2 – параметры модели; t – время; ε_t – случайные ошибки, являются независимыми нормально распределенными случайными величинами.

Результаты построения моделей для приведенной интенсивности в промежутке времени с 7:00 до 9:00 представлены в таблице 5.

Таблица 5 – Моделирование приведенной интенсивности в промежутке времени с 7:00 до 9:00

Вход	Модель	RMSE	MAE
<i>A</i>	$5,5779 + 0,367t - 0,0034t^2$	4,8379	3,893
<i>B</i>	$16,4 + 0,867t - 0,0088t^2$	5,9846	4,7408
<i>C</i>	$7,235 + 0,512t - 0,0049t^2$	5,5047	4,535
<i>D</i>	$9,808 + 0,559t - 0,0066t^2$	4,7278	3,768

При этом проверка адекватности моделей вида (2) показала, что параметры модели являются статистически значимыми, а остатки – независимыми нормально распределенными случайными величинами.

Аналогично исследуем приведенную интенсивность в промежутке времени с 17:00 до 21:00.

График изменения приведенной интенсивности для входа *D* в промежутке времени с 17:00 до 21:00 представлен на рисунке 7. Для входов *A*, *B*, и *C* такие графики имеют аналогичный вид.

Вид рисунка 7 показывает, что приведенная интенсивность движения в промежутке с 17:00 до 21:00 имеет тенденцию к убыванию. При этом динамика убывания близка к линейной.

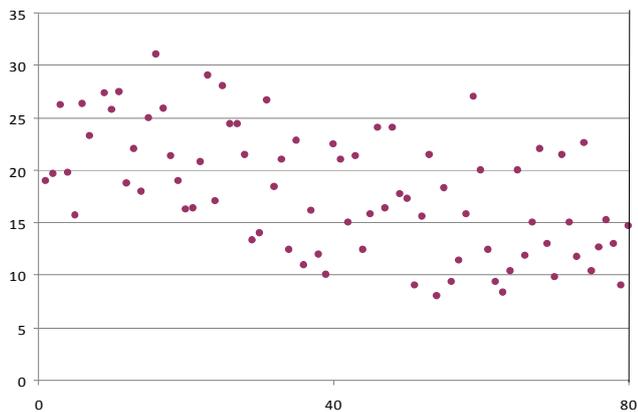


Рисунок 7 – Динамика изменения приведенной интенсивности с течением времени для входа D в промежутке с 17:00 до 21:00

Исследуя несколько альтернативных моделей для описания приведенной интенсивности в промежутке времени с 17:00 до 21:00 получили, что для каждого входа наилучшей моделью является линейная модель

$$N_t^{\text{прив}} = \beta_0 + \beta_1 t + \varepsilon_t. \quad (3)$$

Результаты построения моделей для приведенной интенсивности в промежутке времени с 17:00 до 21:00 представлены в таблице 6.

Таблица 6 – Моделирование приведенной интенсивности в промежутке времени с 17:00 до 21:00

Вход	Модель	RMSE	MAE
A	$17,295 - 0,0665t$	4,374	3,366
B	$40,143 - 0,16t$	6,86	5,476
C	$22,84 - 0,076t$	5,143	4,245
D	$23 - 0,111t$	4,445	3,558

Проверка показала, что для каждого входа модель вида (3) является адекватной.

Получено 18.03.2016

A. N. Starovoytov, B. Shapovalova. Establishment of laws changes intensity traffic flows.

The intensity of the traffic flow is one of its basic characteristics, you need to know for the implementation management actions. This fact determines the urgency of the task to identify patterns of change in the intensity of traffic in time. The article analyzes the changes in the intensity of traffic flows at the intersection. As the original data were taken data from camera surveillance at the intersection of International and Lenin Avenue in the city of Gomel. As a result of this analysis, three period of time were identified with different patterns of change in the intensity of transport flows. It is established that in the morning hours the intensity of the traffic flows increases quadratically, in the daytime the intensity is relatively constant, and in the evening hours – falls off linearly. For each time interval constructed statistical models, installed their adequacy.

Таким образом, в изменении приведенной интенсивности можно выделить три промежутка времени. Первый соответствует утренним часам, в течение которых приведенная интенсивность возрастает до некоторого промежутка времени – утреннего часа «пик», а затем следует небольшой спад. Изменение приведенной интенсивности в указанное время может быть описано квадратической моделью (2). В дневные часы приведенная интенсивность относительно постоянна, то есть для ее краткого описания достаточно использовать среднее значение. При этом распределение приведенной интенсивности в данный промежуток времени является нормальным или близким к нормальному (гамма-распределение). В вечерние часы приведенная интенсивность убывает; для ее описания может быть использована линейная модель (3).

Список литературы

- 1 **Мельников, И. И.** Автоматизация процесса сбора и анализа данных о транспортных потоках для предупреждения образования заторов на дорогах г. Могилева / И. И. Мельников, К. А. Демиденков, И. А. Евсеенко // Проблемы физики, математики и техники. – 2014. – № 2. – С. 84–88.
- 2 ТКП 45-3.03-227-2010. Улицы населенных пунктов. Строительные нормы проектирования. – Минск : М-во архитектуры и стр-ва Респ. Беларусь, 2011. – 46 с.
- 3 **Айвазян, С. А.** Прикладная статистика: Основы моделирования и первичная обработка данных : справ. изд. / С. А. Айвазян, Е. С. Енюков, Л. Д. Мешалкин. – М. : Финансы и статистика, 1983. – 471 с.
- 4 **Кобзарь, А. И.** Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников / А. И. Кобзарь. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2006. – 816 с.
- 5 **Харин, Ю. С.** Математические и компьютерные основы статистического анализа данных и моделирования : учеб. пособие / Ю. С. Харин, В. И. Малюгин, М. С. Абрамович. – Минск : БГУ, 2008. – 455 с.