

ПРОГРАММНОЕ ТЕСТИРОВАНИЕ БАЗОВЫХ СИМБИОТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ТРАНСПОРТНОГО ПОТОКА

Доктор техн. наук, профессор **Данилов О.Ф.**,
кандидат техн. наук, доцент **Колесов В.И.**,
Сорокин Д.А., Гуляев М.Л.
(Тюменский индустриальный университет)

SOFTWARE TESTING OF BASIC SYMBIOTIC TRANSPORT FLOW MODELS

O. F. Danilov, Doctor (Tech.), Professor
V.I. Kolesov, Ph.D. (Tech.), Associate Professor
D.A. Sorokin, M. L. Gulyaev
(Tyumen Industrial University)

Транспортный поток, симбиотическая модель, модель следования за лидером, гидродинамическая модель, программное тестирование.

Traffic flow, symbiotic model, leader-following model, hydrodynamic model, software testing.

Описан программный модуль для тестирования авторской математической модели транспортного потока, представляющей собой симбиоз двух широко известных моделей: модели следования за лидером и гидродинамической модели. Программным тестированием подтверждена безошибочность рабочих алгоритмов модели для идентифицированных диапазонов входных параметров.

The article describes a software module for testing the author's mathematical model of traffic flow, which is a symbiosis of two well-known models: the leader-following model and the hydrodynamic model. Software testing has confirmed the accuracy of the operating algorithms of the model for the identified ranges of input parameters.

1. Введение

В научном мире интерес к методам математического моделирования транспортных потоков стабильно высок. Специфика предметной области заключается в нарастающей сложности используемых математических аппаратов, что неизбежно приводит к необходимости создания программных продуктов, позволяющих оценить адекватность инновационных моделей.

Методология описываемого в статье научного исследования подробно описана авторами в публикациях [1-2], однако, следует отметить, что впервые симбиотические модели были предложены в работах [3-4]. Данная статья представляет логическое продолжение обозначенных работ и посвящена комплексному программному тестированию разработанных математических моделей.

2. Симбиотическая модель транспортного потока (ТП)

Структурная и параметрическая идентификации авторской модели подробно рассмотрены в работе [1], однако, для понимания предлагаемых решений необходимо обозначить основные математические положения.

Модель следования за лидером базируется на продольном динамическом габарите (ПДГ) транспортного средства (ТС)

$$L(V) = m_2 \cdot V^2 + m_1 \cdot V + m_0, \quad (1)$$

где L – продольный динамический габарит, м;
 V – скорость ТП, м/с;

m_2 – коэффициент, $\text{с}^2/\text{м}$;
 m_1 – коэффициент, с;
 m_0 – коэффициент, м.

Основное уравнение ТП определяет его плотность

$$q(V) = 1/L(V) = 1 / (m_2 \cdot V^2 + m_1 \cdot V + m_0), \quad (2)$$

и интенсивность

$$N(V) = V \cdot q(V) = V / (m_2 \cdot V^2 + m_1 \cdot V + m_0), \quad (3)$$

где q – плотность, ТЕ/км;
 N – интенсивность, ТЕ/ч;
ТЕ – транспортная единица.

Экстремум интенсивности достигается при выполнении условия $dN(V) / dV = 0$

$$V_{\max N} = \sqrt{m_0 / m_2}, \quad (4)$$

а плотности при $V = 0$

$$q_{\max} = 1 / m_0. \quad (5)$$

В рамках данной работы для базовых моделей принимаются входные параметры ТП, функционирующего на асфальтобетонном дорожном покрытии с различными его состояниями: от чистого сухого до гололеда [1].

Модель ПДГ имеет низкую работоспособность в диапазоне малых плотностей ТП, подверженного скоростным ограничениям, что приводит к необходимости применения альтернативной математической модели для упомянутых условий.

Гидродинамическая модель ТП, название которой обусловлено использованием уравнений для сжимаемой жидкости, представлена авторами в виде

$$V(q) = V_{опр} - K \cdot q^a, \quad (6)$$

где $V_{опр}$ – максимальная скорость (учет ограничения), км/ч;

K – константа, характеризующая дорожные условия, км³/ч;

a – коэффициент, обуславливающий кривизну функции.

В рамках данной работы для базовых моделей коэффициент $a=2$, что позволяет идентифицировать уравнения для всех динамических характеристик ТП, в част-

$$V_a = \frac{-(3 \cdot m_1 - 4 \cdot m_2 \cdot V_{опр}) + \sqrt{(3 \cdot m_1 - 4 \cdot m_2 \cdot V_{опр})^2 - 4 \cdot 5 \cdot m_2 \cdot (m_0 - 2 \cdot m_1 \cdot V_{опр})}}{2 \cdot 5 \cdot m_2}, \quad (8)$$

где V_a – скорость ТП в точке сопряжения, м/с.

Уравнение (8) получено в ходе ряда математических преобразований, учитывающих поиск и приравнение производных функций модели ПДГ и гидродинамической модели. При этом, зная скорость потока, легко определить все необходимые значения динамических характеристик в точке сопряжения.

3. Метод оценки эффективности работы ТП

Методология теоретических и экспериментальных исследований подробно описана авторами в публикации [2]. Обобщенный критерий эффективности представляет собой взвешенную сумму ключевых показателей: производительность, безопасность функционирования и экологическая безопасность. Упомянутые показатели определяются нормированными значениями интенсивности ТП, интенсивности происшествий, связанных с травматизмом людей и емкости ТП соответственно.

Обобщенный критерий представлен выражением

$$Eff = \sum_{i=1}^n \alpha_i \cdot g_i, \quad (9)$$

где Eff – обобщенный критерий эффективности работы ТП;

α_i – весовые коэффициенты частных критериев $\left(\sum_{i=1}^n \alpha_i = 1\right)$;

g_i – частные критерии эффективности работы ТП.

Первый частный критерий представлен в виде

$$g_1 = \frac{N}{N_{max}}, \quad (10)$$

где N_{max} – максимальная интенсивность ТП, ТЕ/ч.

Второй частный критерий представлен соотношениями

$$g_2 = 1 - \frac{N_{tr}}{N_{trmax}}, \quad (11)$$

ности зависимости «скорость - плотность» (6) и «интенсивность - скорость»

$$N(V) = \sqrt{\frac{V_{опр} \cdot V^2 - V^3}{K}}. \quad (7)$$

Симбиотическая модель генерируется путем слияния модели ПДГ и гидродинамической модели в точке сопряжения соответствующих функций, подразумевающей равенство производных этих функций, обеспечивающее плавный переход от одной модели к другой. Физический смысл этого перехода заключается в том, что поток из связанного состояния (модель ПДГ) переходит в свободное (гидродинамическая модель), а точка сопряжения определяется параметрами модели ПДГ, имеющими явный физический смысл

$$N_{tr} = N_{dtp} \cdot P, \quad (12)$$

$$N_{dtp} = N \cdot RP, \quad (13)$$

где N_{tr} – интенсивность дорожно-транспортных происшествий (ДТП), связанных с травматизмом людей, 1/ч;

N_{trmax} – максимальная интенсивность ДТП, связанных с травматизмом людей, 1/ч;

N_{dtp} – интенсивность ДТП, 1/ч;

P – вероятность травматизма (ранения) человека при ДТП;

RP – риск ДТП (принято допущение, что для определенного интервала времени RP является константой).

Третий частный критерий описан формулами

$$g_3 = 1 - \frac{e}{e_{max}}, \quad (14)$$

$$e = N \cdot q, \quad (15)$$

где e – емкость ТП, 1/ч.км;

e_{max} – максимальная емкость ТП, 1/ч.км.

Широкий спектр входных параметров модели позволяет комплексно подойти к решению задач в области управления дорожным движением. Целевая функция определяется максимизацией обобщенного критерия эффективности (9).

Для проверки работоспособности используемых математических алгоритмов авторами разработан программный модуль «Эффективный транспортный поток - 01».

4. Описание программного модуля «ETF-01»

На рис. 1 представлено основное рабочее окно программы, содержащее три секции. Первая секция включает информационное сопровождение, объясняющее специфику исследуемых характеристик ТП. Вторая секция предназначена для ввода исходных данных модели. Третья секция иллюстрирует графические зависимости изучаемых параметров с ключевыми числовыми данными.

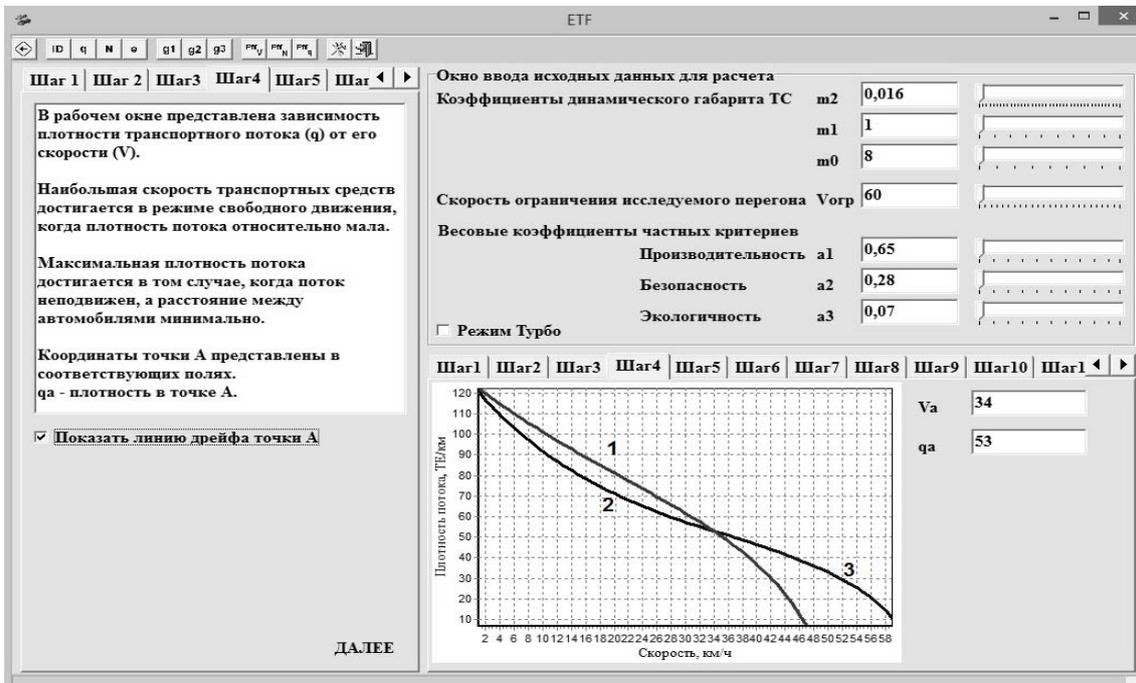


Рис. 1. Рабочее окно программного модуля. Зависимость плотности ТП от его скорости

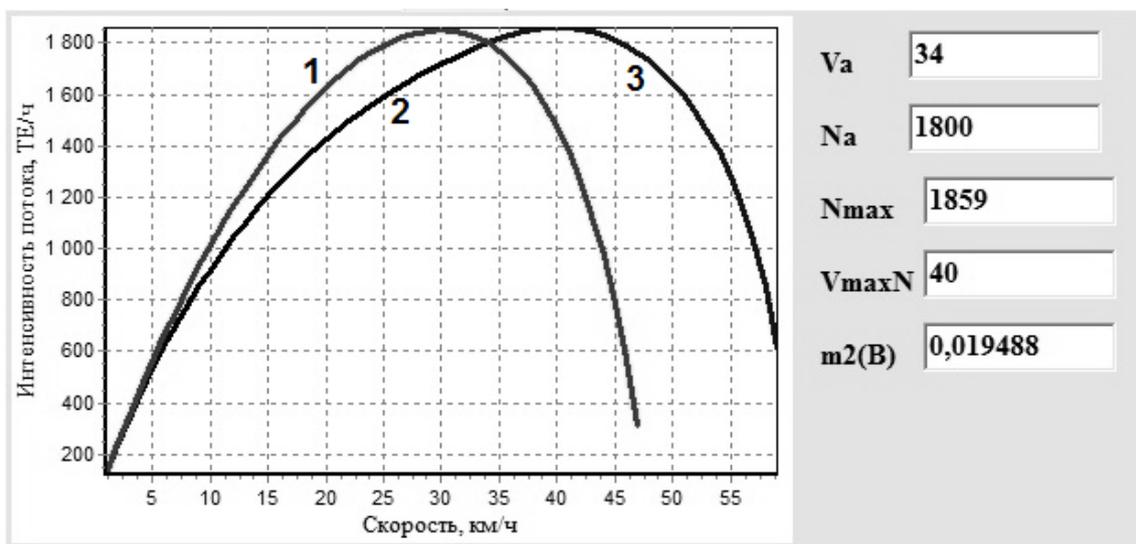


Рис. 2. Зависимость интенсивности ТП от его скорости

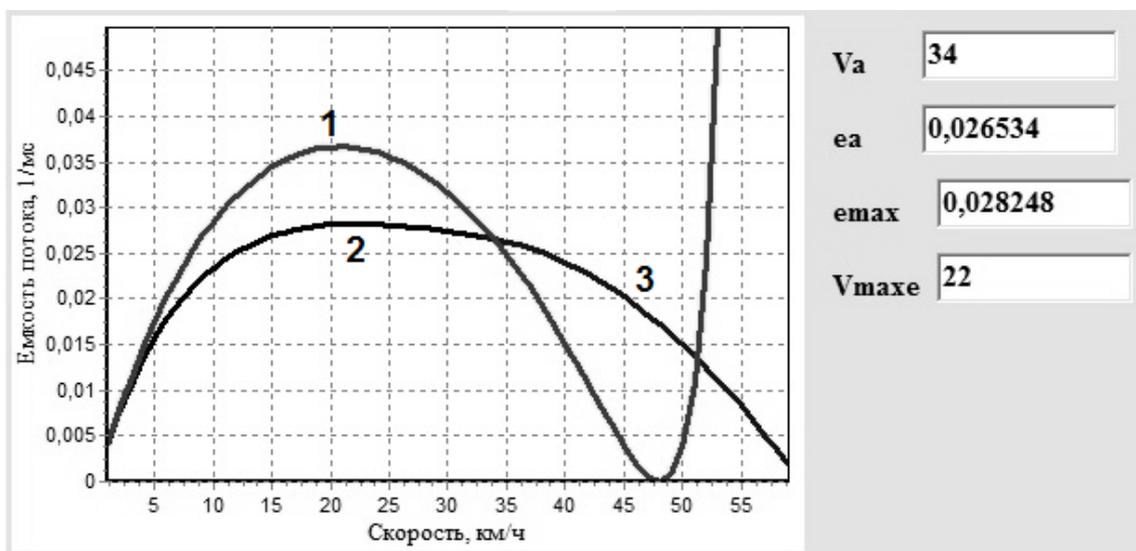


Рис. 3. Зависимость емкости ТП от его скорости

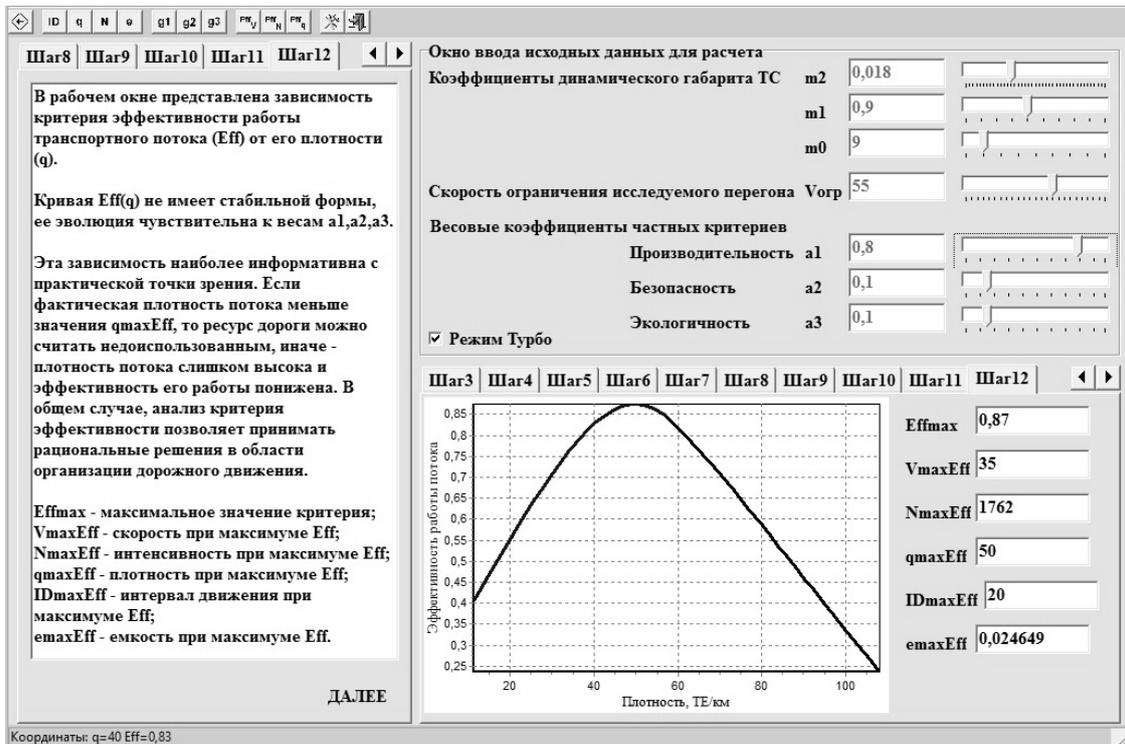


Рис. 4. Зависимость обобщенного критерия эффективности работы ТП от его плотности ($a_1=0.8, a_2=0.1, a_3=0.1$)

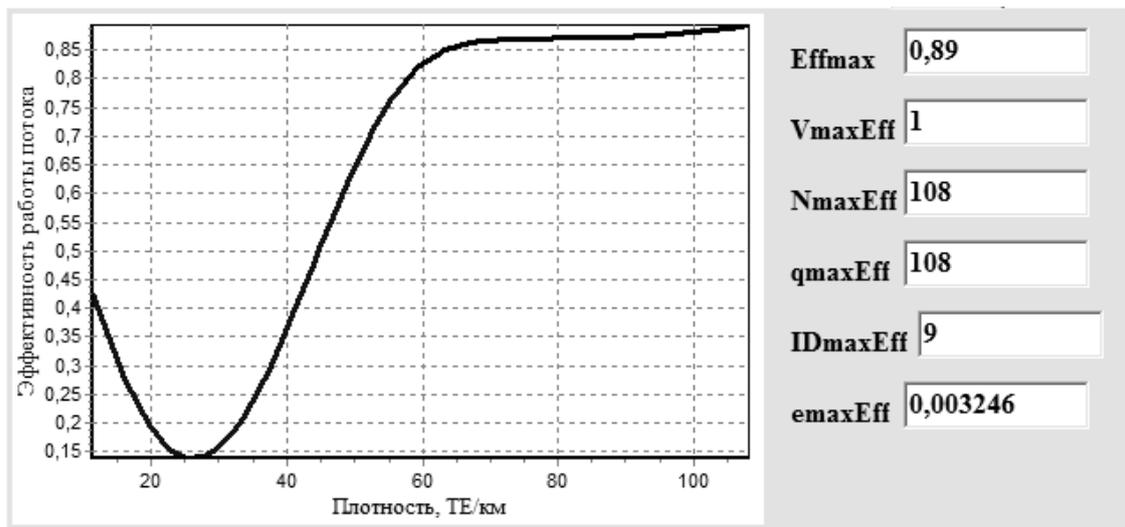


Рис. 5. Зависимость обобщенного критерия эффективности работы ТП от его плотности ($a_1=0.1, a_2=0.8, a_3=0.1$)

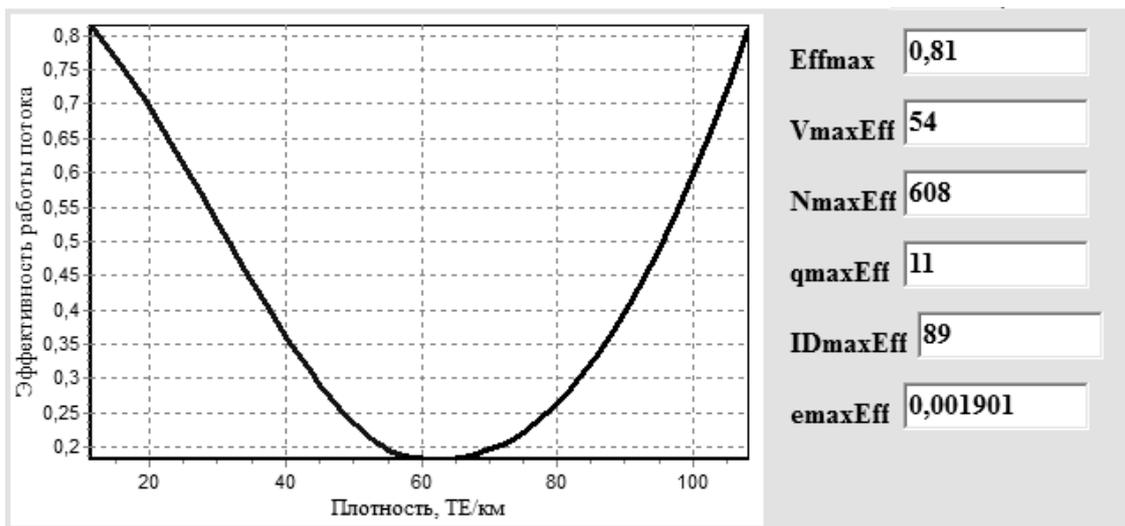


Рис. 6. Зависимость обобщенного критерия эффективности работы ТП от его плотности ($a_1=0.1, a_2=0.1, a_3=0.8$)

Линия обозначенная цифрой один описывает траекторию дрейфа точки сопряжения упомянутых моделей при смене состояния дорожного покрытия. Цифрой два обозначена функция, соответствующая модели ПДГ. Цифрой три определена кривая, соответствующая гидродинамической модели. Программный модуль позволяет исследовать любые взаимосвязи динамических характеристик ТП, в частности связи «интенсивность - скорость» (рис. 2) и «емкость - скорость» (рис. 3).

Зависимость обобщенного критерия эффективности

от плотности ТП иллюстрируют рис. 4-6 (для рис. 4 $a_1=0.8, a_2=0.1, a_3=0.1$, для рис. 5 $a_1=0.1, a_2=0.8, a_3=0.1$, для рис. 6 $a_1=0.1, a_2=0.1, a_3=0.8$). Следует отметить, что эволюция описываемой кривой очень чувствительна к весам частных критериев.

Анализ рис. 4-6 позволяет определить оптимальную плотность ТП, то есть плотность, при которой эффективность работы максимальна. Кроме того, для упомянутого экстремума рассчитаны необходимые для анализа динамические характеристики.

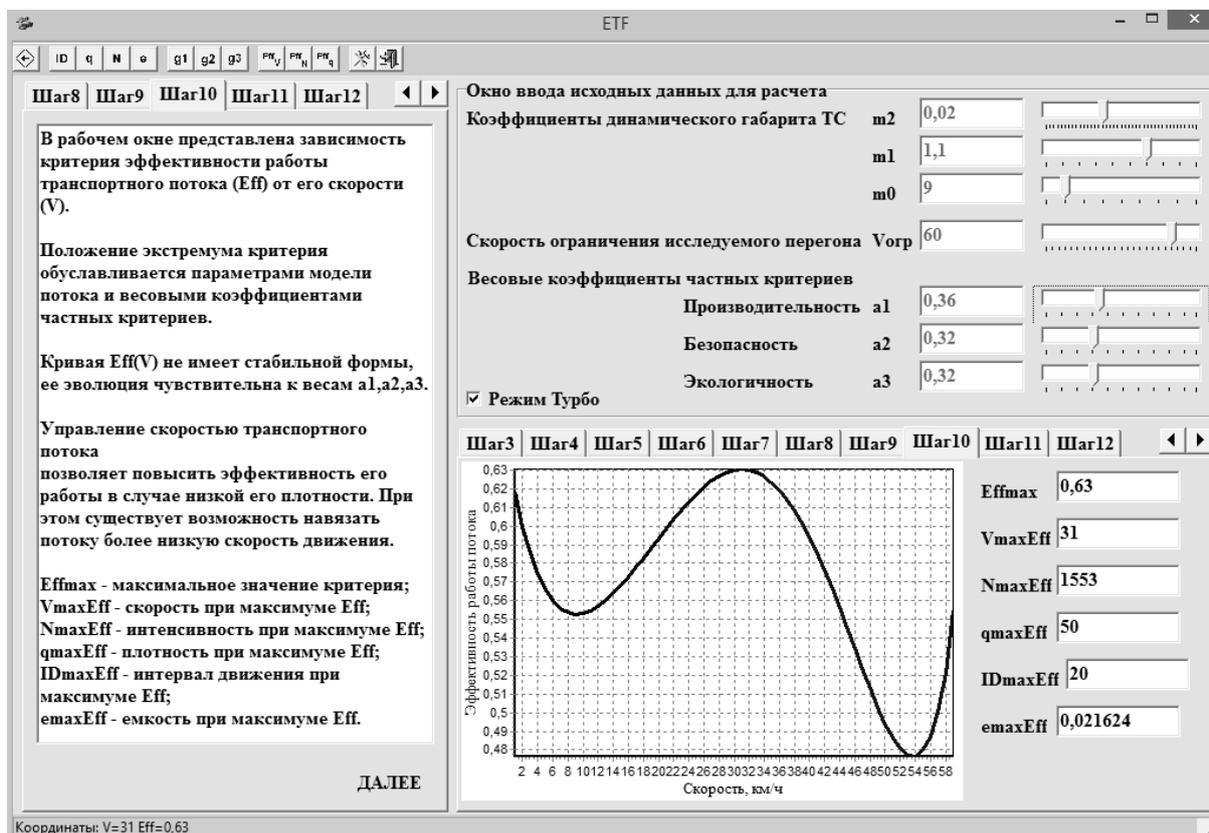


Рис. 7. Зависимость обобщенного критерия эффективности работы ТП от его скорости ($a_1=0.36, a_2=0.32, a_3=0.32$)

На рис. 7 представлена зависимость обобщенного критерия эффективности от скорости ТП, обозначена скорость достижения максимальной эффективности и соответствующие ей динамические характеристики.

5. Заключение

Результаты программного тестирования подтверждают работоспособность симбиотических моделей транспортного потока и безошибочность предложенных математических решений.

Результаты исследований ориентированы на генерацию перспективных инженерных решений в области математического моделирования транспортных потоков и управления дорожным движением.

Литература

1. Danilov O. F. Development of mathematical model for traffic flow within speed limitation / O. F. Danilov, V. I. Kolesov, D. A. Sorokin. – Text : electronic // MATEC Web of Conferences. – 2016. – № 73, 01028. – URL: <https://doi.org/10.1051/mateconf/20167301028> (date of the application 14.10.2020).

2. Danilov O. F. Development of criteria for transport flow efficiency assessments of the city street road network / O. F. Danilov, V. I. Kolesov, D. A. Sorokin. – Text : electronic // MATEC Web of Conferences. – 2016. – № 73, 01010. – URL: <https://doi.org/10.1051/mateconf/20167301010> (date of the application 14.10.2020).

3. Колесов В. И. Нормированная фундаментальная диаграмма транспортного потока в условиях ограничения скорости / В. И. Колесов – Текст : непосредственный // Новые информационные технологии в нефтегазовой отрасли и образовании : Материалы V Всероссийской научно-технической конференции с международным участием. – Тюмень : ТюмГНГУ, 2012. – С. 25-31.

4. Колесов В. И. Нормированная фундаментальная диаграмма транспортного потока в условиях свободного движения / В. И. Колесов – Текст : непосредственный // Нефть и газ Западной Сибири : материалы Международной научно-практической конференции. – Тюмень : ТюмГНГУ, 2013. – С. 26-30.

Сведения об авторах:

Данилов Олег Федорович, Заслуженный деятель науки РФ, Почетный работник высшего профессионального образования России, заведующий кафедрой «Автомобильного транспорта, строительных и дорожных машин».

Телефон: 8(3452) 68-10-09,
e-mail: danilovof@tyuiu.ru.

Колесов Виктор Иванович, Заслуженный работник высшей школы РФ, ведущий научный сотрудник на кафедре «Автомобильного транспорта, строительных и дорожных машин».

Телефон: 8(3452) 68-10-09,
e-mail: vikolesov@yandex.ru.

Сорокин Денис Александрович - ассистент, кафедры «Автомобильного транспорта, строительных и дорожных машин».

Телефон: 8(3452) 68-10-09,
e-mail: sorokinda@tyuiu.ru.

Гуляев Максим Леонидович - ассистент, кафедры «Автомобильного транспорта, строительных и дорожных машин».

Телефон 8(3452) 68-10-09,
e-mail: gulyev_ml72@mail.ru.

Все авторы – Тюменский индустриальный университет. Адрес: 625001 Тюмень, ул. Луначарского, 2.