

Сохацький Анатолій Валентинович

*доктор фізико-математичних наук, професор,
завідувач кафедри «Транспортних систем та технологій»
Університету митної справи та фінансів*

Сохацкий Анатолий Валентинович

*доктор физико-математических наук, профессор,
заведующий кафедрой «Транспортных систем и технологий»
Университета таможенного дела и финансов*

Sokhatskyi Anatoliy

*Doctor of physico-mathematical sciences, Professor
University of Customs and Finance*

Романенко Євген Михайлович

*аспірант кафедри «транспортних систем та технологій»
Університету митної справи та фінансів*

Романенко Евгений Михайлович

*аспирант кафедры «Транспортных систем и технологий»
Университета таможенного дела и финансов*

Romanenko Yevgen

*Graduate Student of the
University of Customs and Finance*

Іванисенко Іван Сергійович

*аспірант кафедри «Транспортних систем та технологій»
Університету митної справи та фінансів*

Иванисенко Иван Сергеевич

*аспирант кафедры «Транспортных систем и технологий»
Университета таможенного дела и финансов*

Ivanisenko Ivan

*Graduate Student of the
University of Customs and Finance*

**МОДЕЛЮВАННЯ ЛАНЦЮГОВИХ КРИТИЧНИХ СИТУАЦІЙ
В ЩІЛЬНОМУ ТРАНСПОРТНОМУ ПОТОЦІ**

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ЦЕПНЫХ КРИТИЧЕСКИХ СИТУАЦИЙ
В ПЛОТНОМ ТРАНСПОРТНОМ ПОТОКЕ**

**MODELING CRYSTAL SITUATIONS
IN A CUTTING TRANSPORT FLOW**

Анотація. Проведено дослідження впливу макроскопічних неоднорідностей на розподіл критичних ситуацій в транспортному потоці за допомогою чисельного експерименту. Розроблено графічний метод аналізу місць концентрації критичних ситуацій в транспортному потоці. Визначено, що швидкість поширення ланцюгових критичних ситуацій може в три рази перевищувати швидкість поширення ударної хвилі в транспортному потоці.

Ключові слова: математична модель транспортного потоку, ударні хвилі, транспортні пробки, час до зіткнення, місця концентрації критичних ситуацій, ланцюгові критичні ситуації, показники безпеки дорожнього руху.

Аннотация. Проведено исследование влияния макроскопических неоднородностей на распределение критических ситуаций в транспортном потоке с помощью численного эксперимента. Разработан графический метод анализа мест концентрации критических ситуаций в транспортном потоке. Определено, что скорость распространения цепных критических ситуаций может в три раза превышать скорость распространения ударной волны в транспортном потоке.

Ключевые слова: математическая модель транспортного потока, ударные волны, транспортные пробки, время до столкновения, места концентрации критических ситуаций, цепные критические ситуации, показатели безопасности дорожного движения.

Summary. The study of the influence of macroscopic in homogeneities on the distribution of critical situations in a traffic flow with numerical experiment was carried out. The graphical method of analysis of places of concentration of critical situations in a traffic flow is developed. It is determined that the rate of propagation of chain critical situations can exceed three times the rate of propagation of a shock wave in a traffic flow.

Key words: mathematical model of traffic flow, shock waves, traffic jams, time to collision, places of concentration of critical situations, chain critical situations, indicators of road safety.

Збільшений рівень автомобілізації, переповнення дорожньої мережі, ускладнення умов руху в першу чергу в містах ставлять завдання дослідження впливу заторів («пробок») і ударних хвиль в транспортному потоці на безпеку руху (далі – БР). Дорожньо-транспортна пригода (далі – ДТП) є відносно рідкісною подією, а частота ДТП нестабільна за своєю природою. Тому в якості запобіжного рівня БР використовуються транспортні конфлікти (далі – ТК). Передбачається, що причини, що лежать в основі ТК і ДТП, одні і ті ж. Загальноприйнятою мірою вимірювання ТК є час до зіткнення. Метою роботи було вивчення кількісних показників рівня БР в транспортному потоці з макроскопічними неоднорідностями. Тільки емпіричне вирішення цього питання не дає відповідного витратного ефекту, тому математичне моделювання розподілу ТК в транспортних потоках є важливим практичним завданням. Використана модель транспортного потоку, яка є досить простою для реалізації, але в той же час добре описує якісні характеристики транспортного потоку [1, 2].

Модель характеризується в основному трьома вільними параметрами, два з яких описують здатність автомобіля до уповільнення і прискорення, а третій (стохастичний елемент), задає недосконалість поведінки водія (відхилення від ідеальної траєкторії). Модель, використовує безперервні просторові координати і дискретна по відношенню до часу. Вона може бути застосована для дослідження рівня БР в транспортних потоках змішаного складу[3]. Підхід заснований на

розгляді гальмівних шляхів, тобто на спостереженні, що сума гальмівного шляху і шляху, пройденого веденим автомобілем за час реакції водія, повинна бути менше, ніж гальмівний шлях автомобіля попереду плюс відстань між автомобілями:

$$d(v_f) + v_f \tau \leq d(v_1) + g, \tag{1}$$

де v_f і v_1 – швидкість веденого та лідера; $d(v_f)$ – гальмівний шлях від швидкості; g – дистанція між автомобілями; τ – час реакції веденого (див. рис. 1).

Якщо лідер знаходиться в точці x_1 , і його довжина дорівнює l , а ведений автомобіль має координату x_f , то дистанція g між автомобілями вираховується за формулою:

$$g = x_1 - x_f - l.$$

З огляду на це проста схема правил для опису руху автомобілів в потоці може бути сформульована способом, аналогічним використовуваному в моделі клітинних автоматів [3].

$$v_s = v_l(t) + b \frac{g(t) - V_l \tau}{v + \tau}, \tag{2}$$

$$v_d(t) = \min[v_{max}, v(t) + a(v) \Delta t, v_s(t)], \tag{3}$$

$$v(t + \Delta t) = \max[0, v_d(t) - \mu], \tag{4}$$

$$x(t + \Delta t) = x(t) + v \Delta t, \tag{5}$$

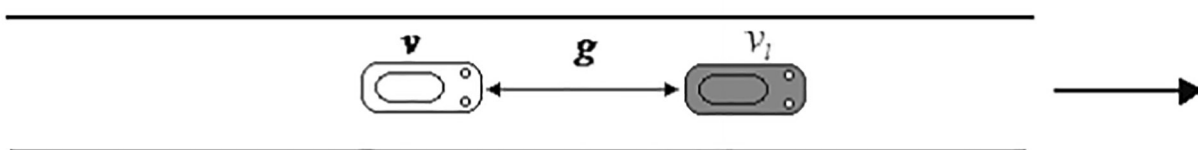


Рис. 1. Модель руху транспортного потоку на односмуговій дорозі [1]

де b – бажане уповільнення автомобіля; a – бажане прискорення автомобіля

Стрілками показані ланцюгові критичні ситуації. Щільність потоку в системі – 26 авт./км. Перше правило дозволяє обчислити максимальну «безпечну» швидкість. (2) можна отримати, якщо дозволити (1) щодо v_f . Друге правило (3) означає, що швидкість обмежена бажаним прискоренням a , безпечною швидкістю v і максимально можливою швидкістю v_{max} . У третьому рівнянні введено випадкове обурення $\eta > 0$, щоб врахувати відхилення від заданої стратегії руху (уповільнення автомобіля). Четвертий вираз задає рух автомобіля.

В роботі для калібрування моделі використовувалися дані про рух потоку, зібрані за допомогою петлі індуктивності на прямій горизонтальній ділянці двосмугової дороги. Обчислення в моделі проводилися з урахуванням отриманих в експерименті розподілів швидкостей для розріджених потоків, щільністю близько 6 авт./км. Вибір величин вільних параметрів дозволив мінімізувати відхилення між моделлю і експериментом. Моделювалася система з періодичними граничними умовами. Довжина модельованої ділянки дороги L становила 4,5 км. Ця довжина достатня для того, щоб уникнути впливу кінцевого розміру модельованої ділянки. При обчисленнях в якості початкової умови вибирався однорідний потік автомобілів. Максимальна швидкість руху автомобілів – 110 км / год.

Найбільш простими емпіричними фактами, які повинні бути відтворені моделлю транспортного потоку, є – фундаментальна діаграма і формування заторів. Модель відтворює ці особливості потоку. Просторово-тимчасове формування і поширення пробки, отримане в результаті чисельного моделювання руху транспортного потоку, зображено на рис. 2. Зазвичай затори («пробки») рухаються в напрямку зворотному руху потоку з приблизно постійною швидкістю. З рис. 2 випливає, що хвиля ущільнення в транспортному потоці за 12 хвилин пройшла шлях, рівний 3 км, тобто її швидкість поширення склала 15 км / год., що відповідає реальності. У чисельному експерименті з моделлю отримана залежність зміни довжини пробки при її зародженні від часу.

Щільність потоку в розрахунках дорівнювала 26 авт./ год. Швидкість зростання довжини пробки (різниця між припливом автомобілів в пробку і відтоком з неї) дорівнює, приблизно, 4 авт./хв. Збільшення щільності потоку до 30 авт./км призводить до зростання швидкості пробки до 10 авт./хв.

Отже, в системі відбувається спонтанний поділ на області високої і низької щільності. Области високої щільності відповідають транспортним заторам, низькою – вільному потоку.

Необхідно вибрати порогову величину Total Transfer Capacity (далі – TTC) для поділу щодо безпечних і кри-

тичних ситуацій. У літературних джерелах наводяться різні величини граничного значення часу до зіткнення [4, 5].

Роботи по вивченню систем попередження зіткнень показали, що вибір порогової величини, що дорівнює 4 секундам, призводить до зайвої кількості помилкових тривог в системі [4]. Величина TTC = 3 секунди викликала найменшу кількість помилкових тривог, хоча вони все ще й були в наявності. Вивчення поведінки водіїв дозволило визначити мінімальну величину TTC = 3,5 секунди для водіїв, які не використовують систему попередження зіткнень, і 2,6 секунди для водіїв, що користуються системою [4].

В [5] повідомляється про більш низькі величини TTC (транспортних засобів) в експериментах на підходах до перетину. Будемо вважати, що величина в 2,6 секунд є кордоном між безпечною і критичною ситуаціями. Розподіли величин TTC в транспортному потоці (див. рис. 3) побудовані за допомогою чисельного експерименту для двох різної щільності, при яких в системі присутні і відсутні макроскопічні неоднорідності.

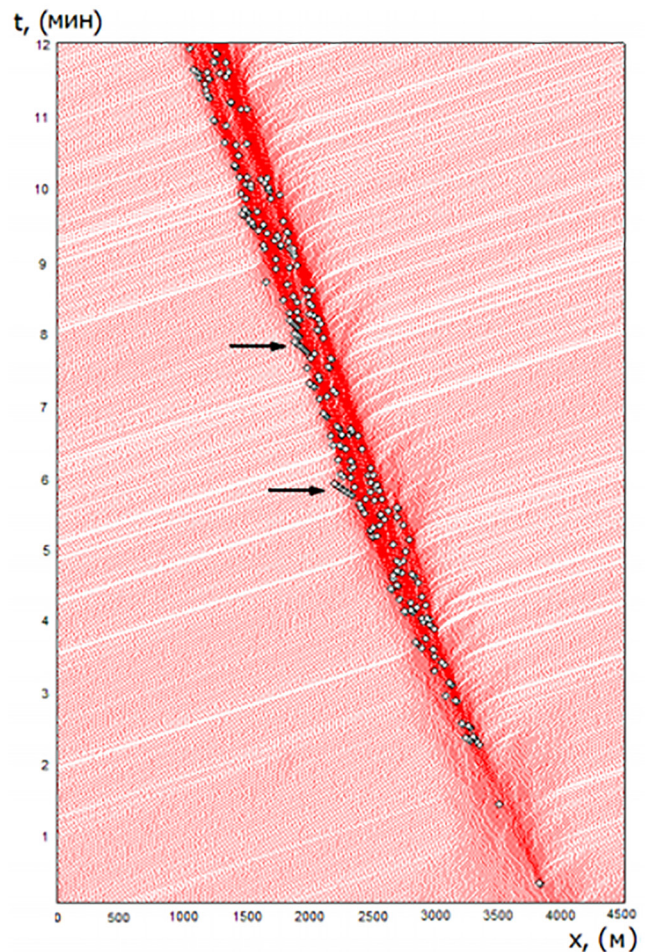


Рис. 2. Розподіл критичних ситуацій, позначених точками у вигляді кіл, на просторово-часовій діаграмі модельованої системи [2]

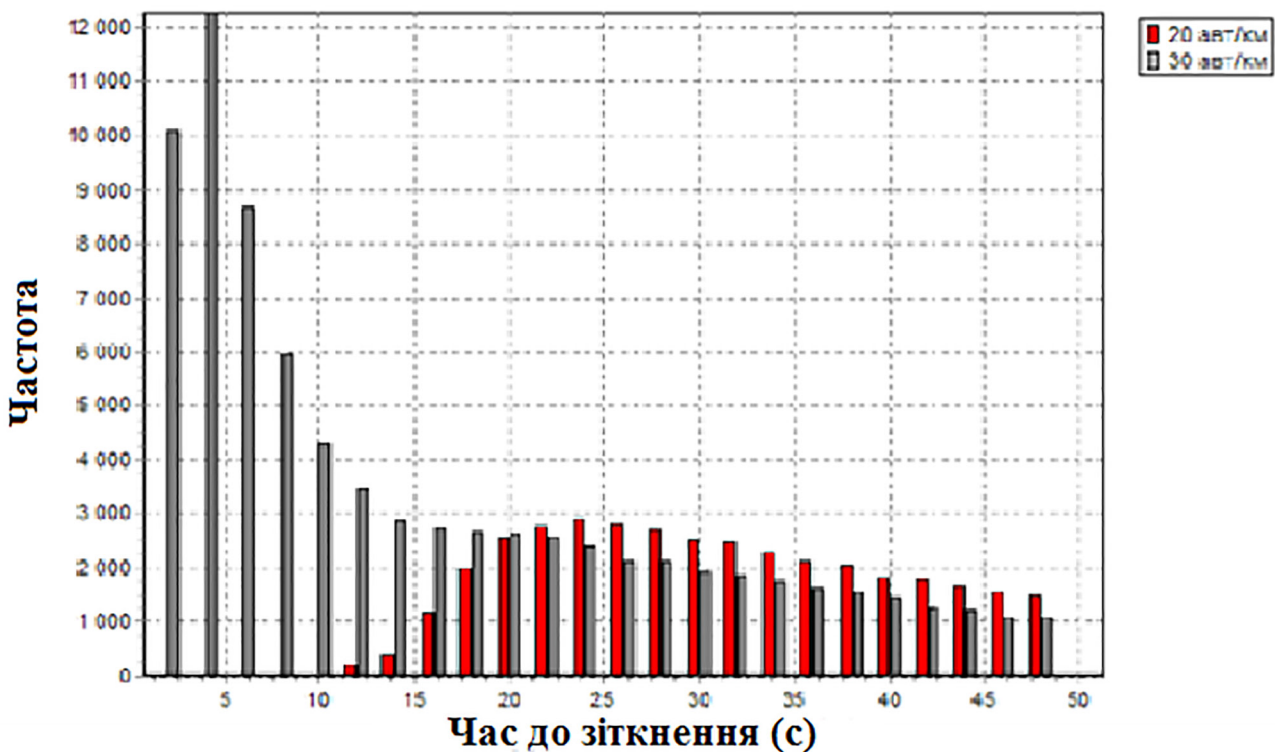


Рис. 3. Розподілу величин ТТС при наявності (щільність 30 авт./км) і відсутності (щільність 20 авт./км) пробок в потоці. Критична ситуація (далі – КС) характеризуються малими величинами ТТС (складено автором на основі [4, 5])

Відсутність пробок в потоці приводить до зрушення частотного розподілу в бік великих величин часу до зіткнення, що перевищують граничне значення, рівне 2,6 секунди. Таким чином, можна припустити, що КС супроводжують ударні хвилі в транспортному потоці.

Це підтверджується розташуванням КС на просторово-часовій діаграмі транспортного потоку при наявності в ньому макроскопічних неоднорідностей (див. рис. 3). КС показані на малюнку точками в формі кіл.

З цього малюнка видно, що КС мають місце, перш за все, на кордоні стрибків ущільнення в транспортному потоці. Обчислювальний експеримент дозволив виявити в модельованій системі наявність ланцюгових КС, які можуть служити провісниками ланцюгових ДТП.

В процесі зародження та зростання пробки відбувається збільшення кількості конфліктних ситуацій. З рис. 3 випливає, що швидкість поширення ланцюгових КС може майже в три рази перевищувати швидкість поширення ударної хвилі в транспортному потоці.

Для оцінки рівня БД використовувався показник, заснований на підрахунку кількості ситуацій з критичними величинами ТТС за період Т збору даних (підсумовуються всі фіксуються в перетині дороги ситуації, при яких ТТС було менше можливого граничного значення ТТС) [3, 4].

Показник P_{cp}^* визначається на кожному кроці моделювання Δt для кожного водія i . Його величина, усереднена за час моделювання T і за населенням з N водіїв і $N = (1 \dots)$, обчислюється за допомогою формули:

$$P_{cp}^* = \frac{\Delta t_i = \sum_{i=1}^N \sum_{i=0}^T \delta_i(t)}{NT}, \quad (6)$$

Рис. 4 ілюструє залежність показника P_{cp}^* від щільності потоку. Слід мати на увазі, що показники рівня БД, засновані на понятті ТТС, висловлюють тільки безпеку, пов'язану з рухом в поздовжньому напрямку і результати моделювання слід інтерпретувати, беручи до уваги це обмеження.

Висновки:

1. Тестування показало, що реалізована модель досягає точної відповідності з спостережуваними даними про рух реальних транспортних потоків. Відсутність пробок в транспортному потоці приводить до зрушення частотного розподілу в бік великих ТТС, що перевищують граничне значення.

2. Розроблено графічний метод аналізу місць концентрації КС в транспортному потоці. Показано, що КС мають місце, перш за все, на кордоні стрибків ущільнення в потоці.

3. Обчислювальний експеримент дозволив виявити наявність ланцюгових КС в модельованій системі,

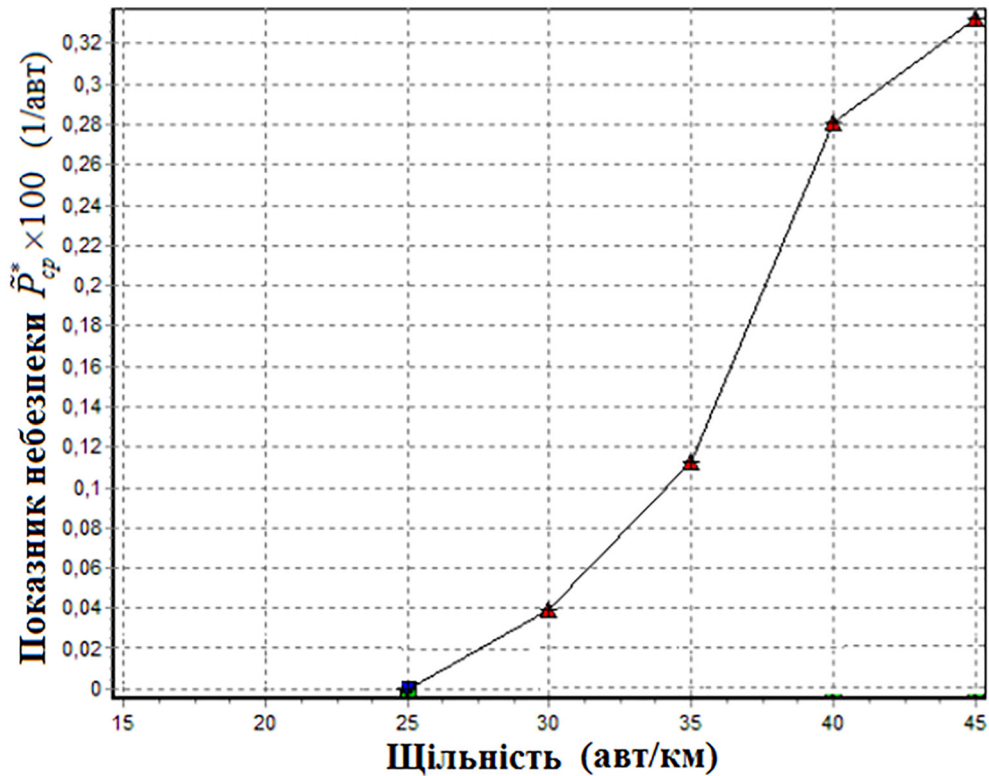


Рис. 4. Залежність усередненого показника безпеки P_{cp}^* від загальної середньої щільності потоку (розробка автора)

які можуть служити передвісником ланцюгових ДТП. Швидкість поширення ланцюгових КС в три рази перевищує швидкість поширення ударної хвилі

в транспортному потоці. Таким чином, введено нове поняття — ланцюгового транспортного конфлікту і отримана оцінка швидкості його поширення.

Література

1. Gipps P. G. A behavioral car following model for computers imulation. Trans. Res. B. — 1981. — Pp. 105–111.
2. Krauss S. Microscopic modeling of traffic flow: investigation of collision free vehicle dynamics. — 1998. — 115 p.
3. Уткин А. В. Моделирование поведения водителя и оценка качества смешанного транспортного потока / А. В. Уткин // «Организация и безопасность движения в крупных городах»: сборник докладов 7-ой Международной конференции. — С.-Петербург, 2006. — С. 84–86.
4. Minderhoud M. M. Supported driving: impacts on motorway traffic flow. — 1999. — 266 p.
5. Vander Horst A. R. A. A time-based analysis of road user behavior in normal and critical encounters. Dissertation, Delft University of Technology. — 1990. — 180 p.