

УДК 656.135.073

Лагереv Р.Ю., Левашев А.Г. Иркутский государственный технический университет, г. Иркутск.

**АНАЛИЗ АЛГОРИТМОВ ОЦЕНКИ ПОКАЗАТЕЛЕЙ
ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ РЕГУЛИРУЕМЫХ ПЕРЕСЕЧЕНИЙ
В УСЛОВИЯХ ПЕРЕНАСЫЩЕНИЯ СЕТИ**

Lagerev R.Y., Levashev A.G., Irkutsk State Technical University, Irkutsk.

**ANALYSIS OF EXISTING MODELS AND FORMULAS FOR
ESTIMATION DELAY, OVERFLOW, AND STOPS
AT OVERSATURATED TRAFFIC SIGNALS**

The article effort is conducted to assess the consistency of delay, number of stops and queue size estimates among various existing analytical and simulation approaches for oversaturated signalized intersections, describes the assumptions, limitations, and strengths of the different delay computation methods.

Транспортная лаборатория ИрГТУ занимается вопросами организации дорожного движения и транспортной планировки городов. Имеющееся в распоряжении лаборатории программное обеспечение и научно-исследовательское оборудование позволяет решать различные задачи оптимизации функционирования улично-дорожной сети и транспортной инфраструктуры городов и регионов. С начала 2008 года инженеры лаборатории начали осваивать новые, наиболее известные во всем мире программы моделирования и оптимизации функционирования транспортной сети. Представляется интересным сравнить и проанализировать работу заложенных в них алгоритмов и апробировать их в условиях перенасыщения сети ($v/c > 1$). Является также занимательным сравнение аналитических моделей, характеризующих дорожно-транспортные условия на перекрестке, американского (HCM 2000), канадского руководства (CCG 1995) с формулой Вебстера (Webster 1958), являющейся основной формулой, применяемой в российских руководствах по проектированию регулируемых пересечений.

Наиболее ответственными узлами улично-дорожной сети являются пересечения дорог со светофорным регулированием. От качества их функциониро-

вания зависит эффективность работы всей транспортной системы в целом. Несмотря на то, что основными оцениваемыми характеристиками работы регулируемого пересечения являются *задержки, длины очередей, количество остановок* транспортных средств (ТС), в нашей стране до сих пор нет единого регламентирующего руководства по их расчету.

В данной статье представлены результаты первого этапа работы – оценки состоятельности алгоритмов расчета задержек на изолированных перекрестках с жестким светофорным регулированием при условии малонасыщенного ($v/c < 1$) и перенасыщенного ($v/c > 1$) потока.

На основе детерминированной теории массового обслуживания (рисунок 1) Вебстер (1958) разработал модель оценки задержек ТС на изолированных перекрестках с жестким светофорным регулированием (формула 1).

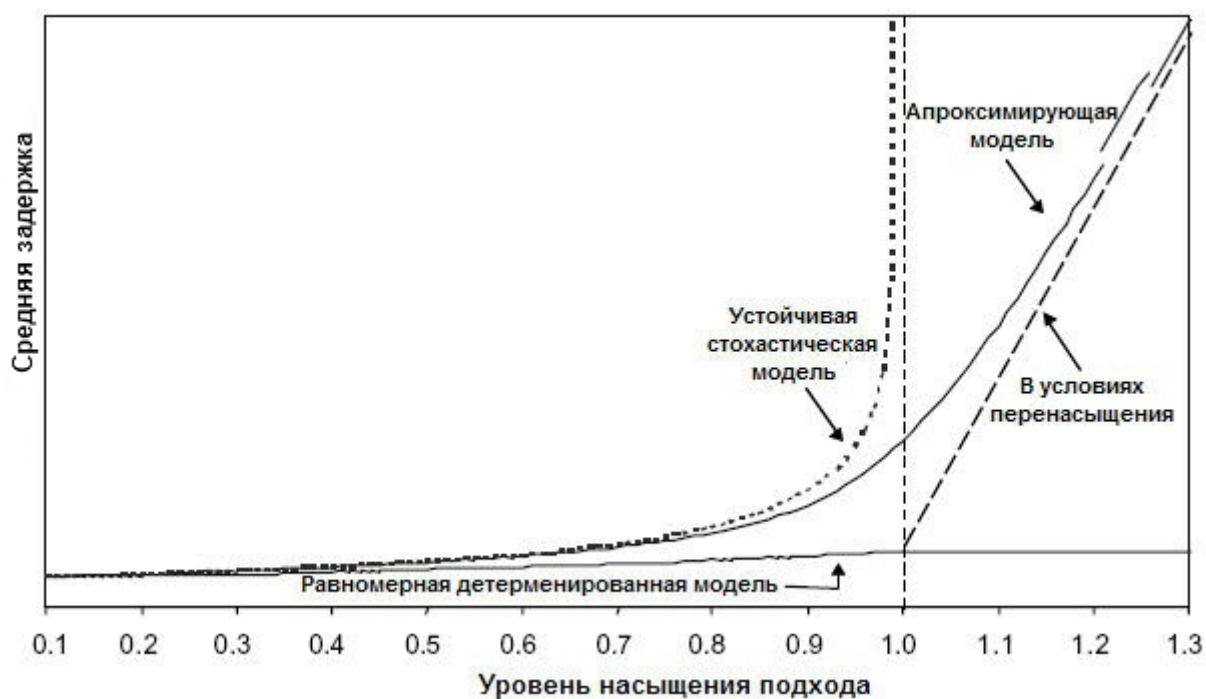


Рисунок 1 – Общее представление вероятностных моделей оценки задержек транспортных средств на регулируемых пресечениях

Первая часть уравнения (1) представляет собой среднюю задержку транспортных средств, при условии их *равномерного* прибытия к перекрестку.

$$d = \frac{C(1-\lambda)^2}{2(1-\lambda X)} + \frac{X^2}{2\nu(1-X)} - 0,65\left(\frac{\tilde{N}}{\nu^2}\right)^{1/3} X^{(2+5\lambda)}, \quad (1)$$

где d – средняя суммарная задержка на единицу ТС, сек; λ – доля эффективного зеленого сигнала в цикле регулирования, сек; C – длительность светофорного цикла, сек; ν – интенсивность прибывающего транспортного потока, авт/сек; g – эффективная длительность зеленого сигнала; X – уровень загрузки подхода ($X \neq 1$).

Вторая часть зависимости (1) учитывает *случайных* характер прибытия транспортных средств. Эту дополнительную задержку приписывают, учитывая вероятность возникновения внезапного прибытия ТС, которое может привести к кратковременному перенасыщению. Третий член введен в модель в качестве корректирующего коэффициента, снижающего величину задержки на 5-15%.

Начиная с 1958 – 1993 гг., было разработано несколько моделей и алгоритмов оценки задержек транспортных средств на регулируемых пересечения [Miller (1963), Akcelik (1981), Cronje (1983)]. Все эти модели основаны на детерминированном подходе и в условиях близких к перенасыщению сильно искажали результаты [2].

Модели на основе вероятностного подхода оказались очень сложными по причине случайного характера прибытия транспортных средств. В результате чего, математические модели, используемые сейчас для оценки задержек упростили: процесс прибытия ТС к перекрестку рассматривается как пуассоновский; средний поток прибытия принимается постоянным в течение всего анализируемого периода; ТС замедляются и ускоряются мгновенно [3].

Наибольшее распространение получили модели, учитывающие как детерминированные, так и вероятностные свойства транспортного потока. Одна из первых формул задержки, наиболее точно учитывающих условия движения на регулируемом перекрестке, была представлена в американском руководстве по пропускной способности дорог (*HCM 1994 – Highway Capacity Manual*) [4]:

$$d = d_1 \cdot (CF) + d_2, \quad (2)$$

$$d_1 = 0,38 \cdot C \cdot \frac{(1 - \frac{g}{C})^2}{1 - \frac{g}{C}}, \quad (3)$$

$$d_2 = 173 \cdot X^2 [(X - 1) + \sqrt{(X - 1)^2 + \frac{m}{c} X}], \quad (4)$$

где d – средняя задержка ТС, сек/авт.; d_1 – задержка, учитывающая равномерное прибытие ТС к перекрестку, сек/авт.; d_2 – задержка, учитывающая нарастающее или неравномерное прибытие ТС к перекрестку, сек/авт.; DF – корректирующий коэффициент, учитывающий прогрессию потока и режим светофорного регулирования (для жесткого регулирования $DF=1$); X – уровень насыщения группы полос; C – длительность цикла регулирования, сек; c – пропускная способность группы полос, авт./час; g – эффективная длительность зеленого сигнала группы полос; m – дополнительный калибровочный член, учитывающий эффект прибытия транспортного потока (для случайного прибытия, с жестким светофорным регулированием $m=16$).

Параметр d_1 подобен первой части уравнения (1) и широко распространен в расчетах задержек при условии равномерного прибытия однородного транспортного потока. Отмечается, что этот параметр корректен только при условии, когда уровень загрузки меньше единицы ($v/c < 1$). Второй параметр d_2 аналогичен второй части формулы Вебстера, учитывает задержки связанные со случайным характером прибытия транспортных средств.

Модель расчета задержек по методике CCG 1995:

$$d = d_1 \cdot k_f + d_2, \quad (5)$$

$$d_1 = 0,50 \cdot C \cdot \frac{(1 - \frac{g}{C})^2}{(1 - \frac{g}{C} \cdot \min(X, 1.0))}, \quad (6)$$

$$d_2 = 15 \cdot t_e [(X - 1) + \sqrt{(X - 1)^2 + \frac{240X}{ct_e}}], \quad (7)$$

$$k_f = \frac{(1 - \frac{q_{gr}}{q}) \cdot f_p}{1 - \frac{g}{C}}, \quad (8)$$

где d – средняя задержка, приходящаяся на один приведенный автомобиль, сек; d_1 – задержка, учитывающая равномерное прибытие ТС, сек; d_2 – задержка, учитывающая неравномерное прибытие ТС, сек; k_f – корректирующий фактор, учитывающий качество прогрессии транспортного потока; C – длительность цикла регулирования, сек; c – пропускная способность группы полос, прив. авт./час; g – эффективная длительность зеленого сигнала группы полос; t_e – обследуемый период, мин; q_{gr} – величина потока прибывающего за время зеленого сигнала, прив. авт./час; q – суммарный поток прибытия, прив. авт./час; f_p – корректирующий коэффициент, учитывающий пачкообразование ТС во время зеленого сигнала.

В данной модели не отличают стоп-задержки (стоп-задержка – задержка, понесенная ТС при снижении его скорости менее 5 км/ч) от общих задержек, в то время как НСМ 1994 предполагает, что 76% всех понесенных задержек составляют именно стоп-задержки. Поэтому в ССГ представлены эмпирические коэффициенты k_1 , позволяющие из общих задержек выделить стоп-задержки (таблица 1).

Таблица 1 – Переводной коэффициент общих задержек в стоп-задержки

Красный, сигнал, сек	20	25	30	40	50	60	70	80	≥90
k_1	0,36	0,46	0,56	0,71	0,76	0,76	0,76	0,76	0,83

В специальной литературе отмечается, что модель ССГ аналогична модели НСМ 1994. Однако, необходимо учитывать, что уравнения (6) и (7) оценивают общие задержки, в то время как (3) и (4) – стоп-задержки. Кроме того, НСМ 1994 учитывает транспортный поток в натуральных показателях (авт/час), в то время как ССГ в приведенных единицах (прив.авт./час) и, наконец, в моделях

по-разному рассчитывается поток насыщения. В HCM 1994 поток насыщения в среднем на 5% выше по сравнению с CCG 1995.

Наибольший практический интерес представляет формула оценки задержек из американского руководства HCM 2000:

$$d = d_1 \cdot (PF) + d_2 + d_3, \quad (9)$$

$$d_1 = 0,5 \cdot C \cdot \frac{(1 - \frac{g}{C})^2}{(1 - \min(1, X) \frac{g}{C})}, \quad (10)$$

$$d_2 = 900 \cdot T \left[(X - 1) + \sqrt{(X - 1)^2 + \frac{8 \cdot k \cdot I \cdot X}{c \cdot T}} \right], \quad (11)$$

$$PF = \frac{(1 - P) \cdot f_p}{1 - \frac{g}{C}}, \quad (12)$$

где d – средняя задержка ТС, сек/авт.; d_1 – равномерная задержка, сек/авт.; d_2 – неравномерная задержка, сек/авт.; d_3 – задержки, возникающие в условиях перенасыщения сети, сек/авт.; PF – коэффициент, учитывающий прогрессии потока в координированных системах; X – уровень насыщения группы полос; C – длительность цикла регулирования, сек; c – пропускная способность группы полос, авт./час; k – коэффициент, учитывающий режим светофорного регулирования (для жесткого $k=1.0$); I – коэффициент учитывающий наличие предыдущего перекрестка (для изолированного $I=1$); T – анализируемый период, час.; P – доля потоков, прибывающих за время горения зеленого сигнала; f_p – коэффициент прогрессии.

Отметим, что данная модель схожа с моделью CCG 1995. Исключение составляют наличие дополнительной переменной d_3 , применение натуральных показателей, определяемых величину потока взамен приведенных и использование анализируемого периода в часах, а не в минутах.

Условия, при которых выполнен сравнительный анализ аналитических моделей: рассматривается изолированный перекресток с одним направлением

движения в каждой группе полос, режим регулирования двухфазный ($g30+y4+r30=C64$), транспортный поток состоит из легковых автомобилей, поток насыщения 1800 авт./час., анализируемый период – 30 минут. Соответствующие результаты оценки задержек сопоставлены с результатами, полученными в ходе моделирования перекрестка при аналогичных условиях в программах VISSIM, AIMSUN и SYNCHRO (таблица 2).

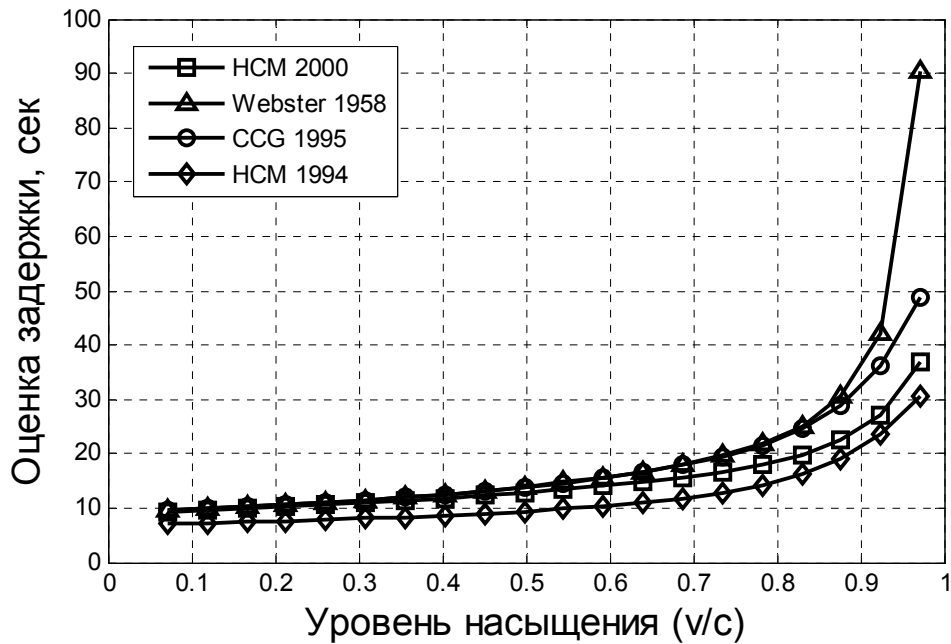


Рисунок 2 - Сравнительный анализ аналитических моделей расчета задержек на изолированных пересечениях при уровне насыщения $v/c < 1$

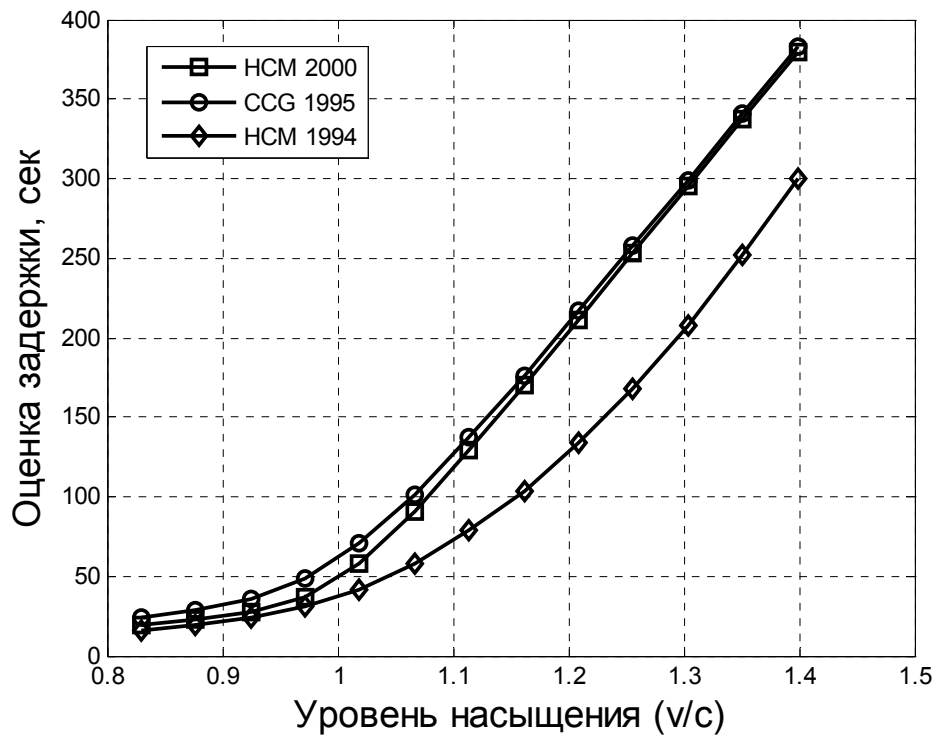


Рисунок 3 - Сравнительный анализ аналитических моделей расчета задержек на изолированных пересечениях при уровне насыщения $v/c > 1$

Таблица 2 - Сопоставительный анализ расчета задержек аналитических моделей и программ микромоделирования ($g=30$ сек, $s=1800$, $C=64$ сек.)

v/c	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4
Сравнение аналитических моделей														
HCM-00	9,6	10,2	10,9	11,8	12,8	14,1	15,8	18,6	24,4	48,6	121	200	294	379
Webster	9,7	10,4	11,3	12,5	13,8	15,7	18,4	22,9	35,0	∞	-	-	-	-
CCG-95	9,7	10,4	11,3	12,5	13,8	15,7	18,3	22,6	32,0	61,5	128	206	299	383
HCM-94	7,2	7,6	8,0	8,6	9,3	10,4	12,0	14,8	20,9	37,1	73	126	207	300
Сравнение программ микромоделирования														
Vissim	10,9	11,2	11,4	11,7	13,8	10,3	15,5	14,2	14,8	17,7	20,9	28,4	52,9	86,8
Amsun NG	7,4	8,4	11,2	11,3	15,7	15,5	17,8	16,7	19,7	25,7	30,5	102,2	165,2	199
Synchro	10,0	10,8	11,8	12,9	14,4	16,3	18,9	23,8	32,5	50,8	82,4	121,8	164,6	207
Simtraffic	9,6	8,6	11,1	12,1	13,1	15,2	18,9	26,0	30,2	92,3	449	675	1046	1264

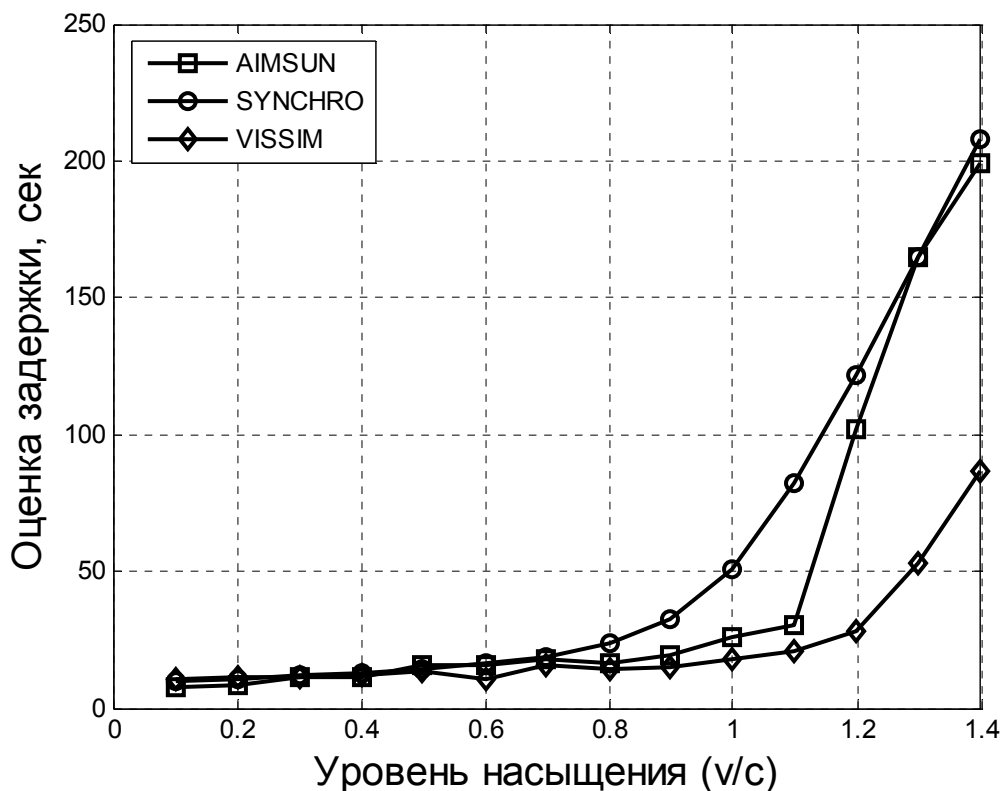


Рисунок 4 - Сравнительный анализ оценки задержек ТС в программах моделирования AIMSUN, SYNCHRO, VISSIM при разных уровнях загрузки

Представленные в таблице 2 и на рисунках 2, 3 результаты сравнительного тестирования аналитических моделей HCM 2000, CCG 1995 и формулы Вебстера, позволяют утверждать, что в условиях малонасыщенного потока оценки задержек имеют приблизительно одинаковые результаты. Так, например, при уровне насыщения $v/c < 0,2$ разброс не превышает 2,5%, при $v/c = 0,4$ не превышает 6%. Вместе с тем, оценки задержек по методике HCM 1994 занижены, особенно это проявляется при уровне насыщения подхода $v/c > 1$. Формула Вебстера при уровне загрузки $v/c \geq 1$ теряет смысл, работоспособными остаются модели HCM 2000, HCM 1994 и CCG 1995.

Сопоставительный анализ программ моделирования (см. таблицу 2, рисунок 4) также выявил наибольшее расхождение в значениях задержек в условиях перенасыщения сети, $v/c \geq 1$. Оценки задержек ТС в условиях малой загрузки остаются примерно одинаковыми. В этой связи необходимо дальнейшее

изучение и сравнение программ и алгоритмов оценки функционирования регулируемых пересечений в условиях перенасыщения сети.

Результаты сравнительного тестирования алгоритмов и программ по критерию «средняя задержка ТС» позволяют утверждать, что используемые в настоящее время алгоритмы и модели дают различные оценки в условиях перенасыщения подхода к перекрестку. Поэтому условия работы регулируемого пересечения и оценка соответствующих параметров, характеризующих его функционирование, значительно отличаются от степени его загрузки и характеристик транспортного потока. Необходимы дополнительные эксперименты, подтверждающие адекватность существующих программ имитационного моделирования транспортных потоков в условиях перенасыщения. В этой связи, следующий этап работы будет посвящен сравнению алгоритмов по критериям «образования очередей» и «количеству остановок ТС» и сравнению этих характеристик с данными, полученными в результате натурных обследований.

Список литературы

1. Abu-Lebdeh, G. and Benekohal, R. F. (1998), "Evaluation of Dynamic Signal Coordination and Queue Management Strategies for Oversaturated Arterials.
2. Engelbrecht, R. J., Fambro, D. B., Roupail, N. M. and Barkawi, A. A. (1997), "Validation of Generalized Delay Model for Oversaturated Conditions", *Transportation Research Record 1572*, TRB, National Research Council, Washington, D. C., pp. 122-130.
3. Messer, C. J. (1998), "Simulation Studies of Traffic Operations at Oversaturated Closely-Spaced Signalized Intersections", *77th Annual Meeting of the Transportation Research Board*, January, Washington, D.C.
4. Shawaly, E. A. A., Ashworth, R. and Laurence, C. J. D. (1988), "A Comparison of Observed, Estimated and Simulated Queue Lengths and Delays at Oversaturated Signalised Junctions", *Traffic Engineering and Control*, Vol. 29, No. 12, pp. 637-643.