

а – $W_0=22$ м/с; б – $W_0=15$ м/с; 1, 2, 3, 4 – $x_0=0,45$ м; 0,35; 0,20; 0,05 м соответственно

Рисунок 3 – Зависимости времени t/τ достижения максимальной скорости $V_{сх}$ от плотности ρ для частиц с диаметром $d=60$ мкм

сделать вывод, что увеличение скорости входа частиц одинаковой плотности также приводит к снижению времени сепарации.

На рис. 3 приведены зависимости t/τ времени достижения максимальной скорости сепарации $V_{сх}$ от плотности ρ для частиц размером $d=60$ мкм. Здесь так же, как и для частиц с диаметром $d=200$ мкм, увеличение плотности частиц приводит к уменьшению времени t/τ .

Следует отметить, что при степенном законе сопротивления эффективность сепарации значительно меньше, чем при стоксовском, а траектории движения частиц меньше отличаются от соответствующих линий тока. Кроме того, в случае степенного закона сопротивления частица прежде, чем достигнуть стенки гидроциклона, совершит гораздо больше оборотов вокруг его оси, чем в случае стоксовского закона сопротивления.

Заключение. Решение дифференциального уравнения движения частицы в криволинейном потоке с учётом степенного закона сопротивления позволило получить траектории движения частиц в горизонтальном криволинейном канале гидроциклона и уяснить характер явлений, происходящих при инерционной сепарации твёрдых частиц из жидкой среды.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Найденко, В.В. Применение математических методов и ЭВМ для оптимизации и управления процессами разделения суспензий в гидроциклонах / В.В. Найденко. – Горький : Волго-Вятское кн. изд-во, 1976. – 287 с.
2. Поваров, А.И. Гидроциклоны на обогатительных фабриках / А.И. Поваров. – Москва : Недра, 1978. – 232 с.
3. Кислов, Н.В. Гидроциклонное осветление воды / Н.В. Кислов, Ф.М. Санюкевич; под ред. М.А. Гатиха. – Минск : Наука і тэхніка, 1990. – 128 с.

Материал поступил в редакцию 05.10.2017

SANYUKEVICH F.M. On particles' motion in a curvilinear channel of hydrocyclone apparatus

Based on the solution of differential equation for particle motion in a curvilinear flow the trajectories of its motion in a curvilinear channel of hydrocyclone apparatus are found.

УДК 629.113:004.94

Монтик С.В., Головченко Ю.А., Монтик Н.С.

МОДЕЛИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПОДРАЗДЕЛЕНИЙ ПО ТЕХНИЧЕСКОМУ ОБСЛУЖИВАНИЮ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

Введение. При проектировании и реконструкции автотранспортных предприятий (АТП) возникает задача оптимизации структуры производственных подразделений по техническому обслуживанию автомобилей, т. е. определение оптимального количества постов зон диагностирования, технического обслуживания (ТО) по критерию минимальных суммарных затрат на содержание производственного подразделения и потери прибыли от простоя автомобилей.

Для моделирования структуры зоны ТО автомобилей широко используются теория массового обслуживания и имитационное моделирование. Одним из преимуществ имитационного моделирования является возможность задавать требуемые законы распределения потока требований на обслуживания и потока обслуживания, а

также отслеживать поведение системы во времени.

Целью данной работы является сравнение методик моделирования структуры производственных подразделений по техническому обслуживанию транспортных средств с использованием теории массового обслуживания (ТМО) и имитационного моделирования на примере зоны ТО автомобилей-самосвалов производственно-коммерческого комплекса (ПКК) филиала «Автовокзал г. Бреста» ОАО «Брестоблавтотранс».

Методика проведения исследований. Количество и режим работы автомобилей-самосвалов, режим работы зоны ТО принимался по данным ПКК филиала «Автовокзал г. Бреста» ОАО «Брестоблавтотранс» (см. табл. 1).

Головченко Юрий Анатольевич, старший преподаватель кафедры машиностроения и эксплуатации автомобилей Брестского государственного технического университета.

Монтик Николай Сергеевич, студент факультета электронно-информационных систем Брестского государственного технического университета.

Беларусь, БрГТУ, 224017, г. Брест, ул. Московская, 267.

Таблица 1 – Режим работы автомобилей-самосвалов и зоны ТО

Модель автомобиля	МАЗ-5516	МАЗ-6501	МАЗ-5551
Количество автомобилей A_u , ед.	22	3	8
Среднесуточный пробег L_{CC} , км	240	250	220
Категория условий	III		
Климатический район	умеренный		
Пробег с начала эксплуатации в долях от нормативного пробега	0,25-0,50	до 0,25	0,50-0,75
Количество дней работы в году	252 дня		
<i>ДРАБ.Г.</i>			
Режим работы зон ТО-1 и ТО-2	252 дня в году, 1 смена, продолжительность смены 8 часов		

Первоначально для данных автомобилей был выполнен технологический расчет по типовой детерминированной методике, изложенной в [1, 2]. Определялось годовое количество технических воздействий в зоне ТО (первого технического обслуживания (ТО-1), второго технического обслуживания (ТО-2)), расчетное количество постов ТО-1 и ТО-2. Также определялся такт поста и ритм производства по методике, приведенной в [3]. Расчетное суммарное количество постов ТО-1 и ТО-2 составило 0,955, поэтому дальнейшее моделирование выполнялось для одноканальных систем массового обслуживания.

Теория массового обслуживания использовалась для аналитического описания работы однопостовой зоны ТО-1 автомобилей-самосвалов МАЗ-5516 как наиболее многочисленной группы. Данная зона ТО-1 моделировалась по методике, изложенной в [4], с помощью: 1) одноканальной системы массового обслуживания (СМО) с простейшими потоками с ожиданием без ограничения длины очереди; 2) одноканальной СМО с простейшими потоками с ожиданием с ограничением на длину очереди (длина очереди ограничивалась одним постом ожидания $m=1$, т. к. число рабочих постов также равно единице); 3) одноканальной замкнутой СМО с простейшими потоками. При этом рассматривался установившийся режим работы СМО, когда вероятностные характеристики системы постоянны во времени. Для разомкнутой СМО интенсивность поступления требований на обслуживание λ определялась как величина обратная такту поста, а интенсивность обслуживания μ – как величина равная отношению годового количества обслуживаний ТО-1 для группы автомобилей одной модели к годовому фонду времени работы зоны ТО-1. Для замкнутой СМО интенсивность поступления требований на обслуживание от одного автомобиля определялась как отношение годового количества обслуживаний ТО-1 для одного автомобиля к годовому фонду времени работы зоны ТО-1.

Имитационное моделирование позволяет исследовать СМО при различных типах входных потоков и разной интенсивности поступления требований в систему, а также различных дисциплинах обслуживания требований. Для имитационного моделирования процесса функционирования зоны ТО использовалась система GPSS World Student Version 5.2.2. Выполнялось имитационное моделирование зоны ТО-1 и ТО-2 для всех моделей автомобилей-самосвалов, имеющих на предприятии (см. табл. 1). При составлении имитационной модели процесса функционирования зоны ТО, зона ТО рассматривалась: 1) в виде разомкнутой СМО с простейшими потоками; 2) в виде разомкнутой СМО с входящим потоком требований и потоком обслуживаний, распределенных по нормальному закону с заданными коэффициентами вариации; 3) в виде замкнутой СМО с простейшими потоками; 2) в виде замкнутой СМО с входящим потоком требований и потоком обслуживаний, распределенных по нормальному закону с заданными коэффициентами вариации. При этом предусматривалась возможность образования очереди.

Для моделирования простейшего потока требований интервал времени между соседними событиями должен иметь показательное распределение [5]. Поэтому при имитационном моделировании зоны ТО как разомкнутой СМО интервалы времени поступления автомобилей на ТО задавались по экспоненциальному закону с математическим ожиданием, равным отношению годового фонда времени

работы зоны ТО к годовому количеству обслуживаний ТО для группы автомобилей одной модели, а интервалы времени на обслуживание одного автомобиля – также по экспоненциальному закону с математическим ожиданием, равным такту поста.

При имитационном моделировании зоны ТО как замкнутой СМО использовался другой подход. Первоначально с помощью оператора GENERATE задавалось требуемое количество автомобилей. Затем выполнялась задержка автомобиля на время выполнения транспортной работы до следующего ТО. Далее автомобиль проходил ТО и возвращался в систему для выполнения транспортной работы до следующего ТО. Цикл повторялся для каждого автомобиля в течение времени моделирования работы зоны ТО. Для простейшего потока требований интервалы времени поступления автомобилей на ТО, а также интервалы времени выполнения ТО задавались по экспоненциальному закону.

Математическое ожидание интервалов времени поступления автомобилей на обслуживание $T_{то-то}$ определялось как отношение годового фонда времени работы зоны ТО к годовому количеству технических обслуживаний для одного автомобиля. Математическое ожидание интервалов времени на обслуживание одного автомобиля принималось равным такту поста.

В ряде работ [6, 7] указывается, что распределение фактического времени выполнения (фактической трудоемкости) ТО, распределение фактического времени поступления автомобилей на ТО, фактических пробегов до ТО подчиняется нормальному закону распределения с различными коэффициентами вариации. Поэтому при выполнении имитационного моделирования использовались также модели с входящим потоком требований и потоком обслуживаний, распределенных по нормальному закону с заданными коэффициентами вариации. Математическое ожидание для интервалов времени поступления на ТО, выполнения ТО, определялось как и для простейшего потока (см. ранее).

С целью определения фактического закона распределения интервалов времени поступления автомобилей-самосвалов на выполнение ТО выполнялась статистическая обработка данных, собранных в зоне ТО ПКК филиала «Автовокзал г. Бреста» ОАО «Брестоблавтотранс». Определение вида и параметров закона распределения, проверка его адекватности проводилась по методике, изложенной в [7].

Результаты вычислительного эксперимента и их обсуждение. Результате аналитического моделирования зоны ТО-1 автомобилей-самосвалов с помощью теории массового обслуживания показывают, что переход от СМО с неограниченной длиной очереди к СМО с очередью ($m=1$) приводит к снижению времени ожидания в очереди на 82% (см. табл. 2), но требует затрат на организацию поста ожидания, что для случая невысокой загрузки поста не рационально. В данном случае коэффициент загрузки поста, который определялся как отношение интенсивности поступления требований к интенсивности обслуживания, равен 0,267. Результаты аналитического моделирования СМО и имитационного моделирования наиболее близки для случая открытой СМО с простейшими потоками и временем моделирования работы зоны ТО один год (см. табл. 3).

В работе [6] приводятся данные, что распределение периодичности выполнения ТО-1 и ТО-2, а также распределения фактической трудоемкости (времени выполнения) ТО-1 и ТО-2 подчиняются нормальному или логарифмически нормальному закону распределения. Также в работе [7] указывается, что нормальному закону подчиняется распределение пробегов автомобилей по календарным срокам (коэффициент вариации 0,10), периодичность профилактических работ (коэффициент вариации 0,20), трудоемкость групп операций регулярных профилактических работ (коэффициент вариации 0,26), а также трудоемкость групп операций профилактических работ и регламентированного по трудоемкости сопутствующего текущего ремонта (коэффициент вариации 0,26).

В результате статистической обработки данных, собранных в зоне ТО производственно-коммерческого комплекса филиала «Автовокзал г. Бреста» ОАО «Брестоблавтотранс» (см. рис. 1), установлено, что фактическое распределение времени поступления автомобилей-самосвалов на выполнение ТО подчиняется нормальному

Таблица 2 – Результаты моделирования зоны ТО-1 автомобилей-самосвалов МА3-5516 с помощью теории массового обслуживания

Вид модели	Интенсивность обслуживания μ , треб./час	Интенсивность поступления на ТО-1 λ , треб./час	Средняя длина очереди Ноч, заявок	Среднее время ожидания заявки в очереди Точ, час
СМО с неограниченной очередью	0,405	0,108	0,0965	0,8956
СМО с ограничением длины очереди ($m=1$)	0,405	0,108	0,053	0,4916
Замкнутая СМО	0,405	0,0049	0,0854	0,6505

Таблица 3 – Результаты имитационного моделирования зоны ТО-1 автомобилей-самосвалов МА3-5516 с простейшими потоками

Вид модели	Открытая СМО ¹	Открытая СМО ²	Открытая СМО ³	Замкнутая СМО ¹
Время поступления на ТО-1, час	9,28	9,28	9,28	204,26
Количество обслуживаний ТО-1 в год	218	220	222	215
Среднее время выполнения ТО-1, час	2,574	2,666	2,603	2,545
Средняя длина очереди Ноч, заявок	0,095	0,094	0,093	0,09
Среднее время ожидания заявки в очереди Точ, час	0,873	0,862	0,842	0,845
Коэффициент загрузки поста	0,278	0,291	0,287	0,271

Примечания:
 1 – время моделирования работы зоны ТО составляло 2016 часа (1 год работы),
 2 – время моделирования работы зоны ТО составляло 4032 часа (2 года работы),
 3 – время моделирования работы зоны ТО составляло 6048 часа (3 года работы),
 – среднее время выполнения ТО-1 составляло 2,47 часа.

Таблица 4 – Результаты имитационного моделирования зоны ТО-1 автомобилей-самосвалов МА3-5516 как открытой СМО с нормальным законом распределения входящего потока и потока обслуживания

Время моделирования работы зоны ТО, год	1	2	1	2
Коэффициент вариации времени поступления на ТО-1	0,2	0,2	0,1	0,1
Количество обслуживаний ТО-1 в год	219	217,5	218	217
Среднее время выполнения ТО-1, час	2,41	2,463	2,413	2,465
Средняя длина очереди Ноч, заявок	0	0	0	0
Среднее время ожидания заявки в очереди Точ, час	0	0	0	0
Коэффициент загрузки поста	0,262	0,266	0,261	0,265

Примечание – среднее время выполнения ТО-1 составляло 2,47 часа; коэффициент вариации времени выполнения ТО-1 составлял 0,26; среднее значение времени поступления на ТО-1 составляло 9,28 часа

закону распределения с коэффициентом вариации 0,3586. Проверка адекватности вероятностной математической модели выполнялась с помощью критерия согласия Пирсона χ^2 : расчетное значение критерия Пирсона составило 1,533, что меньше критического значения 5,991 при доверительной вероятности 0,95 (уровень значимости 0,05) и числе степеней свободы 2 [7]. Вероятность $P(\chi^2)$ равна 0,479 [7]. Значение коэффициента вариации 0,3586 можно объяснить неритмичностью работы автомобилей-самосвалов.

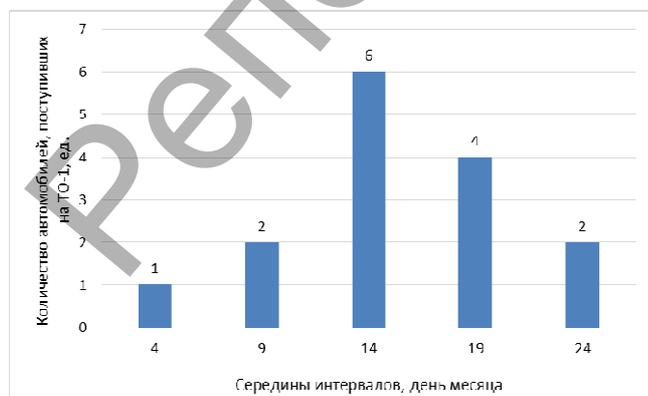


Рисунок 1 – Распределение поступления автомобилей-самосвалов на ТО-1 по дням месяца

Исходя из вышесказанного, выполнялось имитационное моделирование зоны ТО, при котором входящий поток требований на обслуживание и поток обслуживаний подчинялся нормальному закону распределения с указанными выше коэффициентами вариации.

При проведении имитационного моделирования, при котором входящий поток требований на обслуживание распределен по нормальному закону с коэффициентом вариации 0,3586, в случае открытой СМО, а также закрытой СМО с периодом моделирования работы зоны ТО-1 три года, возникает ошибка, вызванная отрицательным приращением времени на обслуживание.

Как видно из табл. 4, 5, 6, при увеличении времени моделирования работы зоны ТО до двух лет годовое количество обслуживаний приближается к значению, полученному по типовому технологическому расчету, а коэффициент загрузки поста – к значению, полученному с помощью ТМО. Результаты имитационного моделирования с использованием замкнутой СМО значительно отличаются от типового технологического расчета и аналитического расчета с помощью ТМО: меньшее количество обслуживаний за год, коэффициент загрузки поста, поэтому для дальнейшего моделирования работы зоны ТО автомобилей-самосвалов использовалась открытая СМО с нормальным законом распределения входящего потока и потока обслуживания.

Результаты моделирования зоны ТО автомобилей-самосвалов ПМК филиала «Автовокзал г. Бреста» ОАО «Брестоблавтогтранс» показали, что годовое количество технических обслуживаний, определенное с помощью имитационного моделирования, совпадает с результатами типового технологического расчета, а коэффициент

Таблица 5 – Результаты имитационного моделирования зоны ТО-1 автомобилей-самосвалов МАЗ-5516 как закрытой СМО с нормальным законом распределения входящего потока и потока обслуживания

Время моделирования работы зоны ТО, год	1	2	1	2	1	2
Коэффициент вариации времени поступления на ТО-1	0,2	0,2	0,3586	0,3586	0,1	0,1
Количество обслуживаний ТО-1 в год	200	206,5	196	206,5	200	208
Среднее время выполнения ТО-1, час	2,418	2,406	2,414	2,406	2,418	2,408
Средняя длина очереди Ноч, заявок	0,052	0,05	0,035	0,042	0,078	0,062
Среднее время ожидания заявки в очереди Точ, час	0,522	0,487	0,355	0,412	0,788	0,596
Коэффициент загрузки поста	0,24	0,246	0,235	0,246	0,24	0,248
Примечание – среднее время выполнения ТО-1 составляло 2,47 часа; коэффициент вариации времени выполнения ТО-1 составлял 0,26; среднее значение времени поступления на ТО-1 составляло 204,26 часа						

Таблица 6 – Сравнение результатов имитационного моделирования и типового технологического расчета зоны ТО автомобилей-самосвалов

Модель автомобиля	Имитационное моделирование		Типовой технологический расчет	
	Количество обслуживаний в год	Коэффициент загрузки поста	Количество обслуживаний в год	Коэффициент загрузки поста
Зона ТО-1				
МАЗ-5516	217,5	0,266	217,54	0,375
МАЗ-6501	6,5	0,009	6,9	0,01
МАЗ-5551	75	0,107	74,1	0,15
Всего	299	0,382	298,54	0,535
Зона ТО-2				
МАЗ-5516	69	0,199	67,9	0,28
МАЗ-6501	6	0,019	6,6	0,03
МАЗ-5551	22,5	0,077	23,2	0,11
Всего	97,5	0,295	97,7	0,42
Всего зона ТО	396,5	0,677	396,24	0,955
Примечание – имитационное моделирование выполнялось с помощью открытой СМО с нормальным законом распределения входящего потока и потока обслуживания, коэффициент вариации времени выполнения ТО составлял 0,26, а времени поступления на ТО – 0,2; время моделирования работы зоны ТО – 2 года.				

загрузки поста (расчетное количество постов) при технологическом расчете в 1,4 раза для ТО-1 и в 1,42 раза для ТО-2 выше, чем при имитационном моделировании (см. табл. 6). Данное значение практически совпадает с коэффициентом резервирования постов $\varphi=1,4$, который используется при технологическом расчете [2, 3].

Заключение. Проведенный анализ методик моделирования позволяет рекомендовать для моделирования и оптимизации структуры зоны ТО имитационные модели, в которых зона ТО рассматривается как открытая СМО с нормальным законом распределения входящего потока и потока обслуживания с коэффициентами вариации, рекомендованными в [7]. Для конкретного предприятия средние значения времени поступления на ТО и времени выполнения ТО и их коэффициенты вариации можно определить по результатам статистической обработки данных о работе зоны ТО. Применение данных имитационных моделей позволяет более точно определить требуемое количество постов ТО и сократить их количество.

По результатам моделирования зоны ТО автомобилей-самосвалов ПКК филиала «Автовокзал г. Бреста» ОАО «Брестоблавтотранс» можно рекомендовать объединение работ ТО-1 и ТО-2 и использование одного универсального поста ТО.

Разработанные имитационные модели используются студентами специальности 1–37 01 06 «Техническая эксплуатация автомобилей» для оптимизации структуры зоны ТО АТП при выполнении лабораторных работ по дисциплине «Основы научных исследований

и инновационной деятельности» и дипломного проектирования.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Техническое обслуживание и ремонт автомобильных транспортных средств. Нормы и правила проведения: ТКП 248-2010 (02190). – Минск: РУП «БелНИИТ «Транстехника», 2010. – 44 с.
2. Общесоюзные нормы технологического проектирования предприятий автомобильного транспорта: ОНТП-01-91. – Москва: Росавтотранс, 1991.
3. Проектирование предприятий автомобильного транспорта: учебник / М.М. Болбас, Н.М. Капустин, А.С. Савич [и др.]; под ред. М.М. Болбаса – Минск: Адукацыя і выхаванне, 2004. – 528 с.
4. Лабскер, Л.Г. Теория массового обслуживания в экономической сфере: учеб. пособие для вузов. / Лабскер, Л. Г., Бабешко, Л. О. – М.: Банки и биржи, ЮНИТИ, 1998. – 319 с.
5. Кудрявцев Е. М. GPSS World. Основы имитационного моделирования различных систем. – М.: ДМК Пресс, 2004. – 320 с.: ил.
6. Захаров, Н. С. Определение параметров зоны технического обслуживания с учетом неравномерности поступления автомобилей / Н. С. Захаров, Г. В. Абакумов, Е. С. Шевелев. – Тюмень: ТюмГНГУ, 2011. – 132 с.
7. Научные исследования и решение инженерных задач: Учебн. пособие/ С. С. Кучур, М. М. Болбас, В. К. Ярошевич. – Мн.: Адукацыя і выхаванне, 2003.

Материал поступил в редакцию 10.10.2017

MONTIK S.V., GOLOVCHENKO Y.A., MONTIK N.S. Simulation of structure of industrial subdividings on maintenance of vehicles

The techniques of simulation of structure of a zone of maintenance of automobiles with usage of queuing theory and simulation modeling in the system GPSS World on an example of a zone of maintenance of dump trucks of JSC "Brestoblavtotrans" are considered. On a foundation of the carried out computational experiment it is offered for simulation and optimization of structure of a zone of maintenance to use simulation models, in which it is considered as open systems of queuing with the normal law of allocation of a going into stream and stream of a service.