

УДК 004.942

ИМИТАЦИОННЫЕ ИГРЫ КАК ИНСТРУМЕНТ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ

Ф.И. Ерешко, Н.В. Белотелов, Ю.И. Бродский, Н.И. Турко (Москва)

*Математика ставит эксперимент
Н.Н. Моисеев*

Введение

Направление по исследованию имитационных игр возникло в рамках работ по системному анализу и исследованию операций в попытках решения принципиальных затруднений при формализации целевых установок участников конфликтных процессов. Затруднения состояли в большой неопределённости намерений и многокритериальности устремлений. Идея состояла в том, чтобы привлечь к подготовке по принятию решений непосредственных участников конфликтных ситуаций, предоставляя им возможности принять решения в модельной обстановке. В школе академика Моисеева Н.Н. в целях прогнозирования был предложен объединённый имитационный подход, в рамках которого для описания реальных процессов используются математические модели, а принятие решений осуществляется реальными участниками имитационной игры. Разработчиком игры был член-корреспондент РАН Павловский Ю.Н.

Изложение примера игры основывается на проведенной имитационной игре в Вычислительном центре Академии Наук группой сотрудников Отдела Моисеева Н.Н., в которой принял участие один из авторов статьи, и подробно описанной в брошюре Павловского Ю.Н. [1].

Как говорил академик Н.Н. Моисеев: «Мы решили придумать свою собственную планету, населить ее вымышленными персонажами, наделять эти персонажи способностью создавать технологии, вести войну и т.д.».

Цель настоящей работы состоит в демонстрации теоретических возможностей в построении и использовании адекватных математических моделей для принятия решений в организационных системах. При выборе реальных стратегий активными участниками операций возможно использование ими иерархического представления процессов и проведения имитационных иерархических игр для получения предварительных аналитических оценок будущего.

В работе предлагается использовать опыт теории исследований операций и дополнить проведение имитационного эксперимента проведением расчётов Исследователем на основе агрегированной иерархической игры.

Следуя установкам теории исследования операций, перечислим активных участников:

- *Оперирующая сторона* – инициатор проведения исследований, обеспечивает получение Гранта;
- *Наблюдатель* приводит изложение иерархической модели и проведенной игры;
- *Исследователь операции* выполняет роль *Посредника*; его действия состоят, в частности, в организации эксперимента, создании агрегированных моделей отдельных участников (например, в линейной записи) на основе принятого динамического описания состояния участников, подготовке информации, проведении расчётов на основе согласованных моделей, использовании для расчётов принятых и сообщённых решений, выборе порогов усталости участников, изменении хода боевых действий в

зависимости от текущих потерь, выборе момента завершения игры. Стратегия Исследователя влияет на реализацию игры;

– *Участники игры* – физические лица – эксперты, заинтересованные в проведении игры, выступая в роли Глав правительств избранных стран.

Описание имитационной игры приводится далее.

Теоретико-игровая постановка и система поддержки принятия решений

Коалиционный выбор представляет из себя одну из главных задач в теории принятия решений. Этому вопросу посвящено значительное число публикаций. Уже в случае игры двух лиц имеет смысл при исследовании задаться вопросом об объединении игроков. Тем более, исходя из формальных соображений, следующим вопросом после постановки игры двух лиц, естественной является ситуация из трёх лиц, а в этой задача рассмотрение коалиций неизбежно.

Далее, при исследовании игровой ситуации необходимо рассмотреть вопрос о соотношении функций целей игроков и возможности их сравнения.

Если критерии оцениваются в различных шкалах, то исследование, скорее всего, обратится к принципу гарантированного результата. Вопросы подобного типа в рамках теории исследования операций рассмотрены в монографии [2].

Одной из первых публикаций на эту тему с использованием свёртки критериев была работа, выполненная Ю.Б. Гермейером и И.А. Вателем [3]. Позднее эта ситуация вошла в литературу под названием «путешественники в одной лодке» [4]. Критерии участников были преобразованы к виду $f_k(x) = \min [F_0(x), F_k(x)]$, где $F_k(x)$ – исходные функции игроков, $F_0(x)$ – исходная общая функция цель для всех игроков. Её особенность состояла в том, что все участники этой конфликтной ситуации, имея разнообразные собственные интересы, были связаны еще и одним общим интересом, общей целью (доплыть до берега). Для того, чтобы достичь этой общей цели, каждый из путешественников должен был часть своих ресурсов – продовольствия, воды, физической силы, одежды, нужных ему для достижения своих собственных целей, выделить в «общий котел». Иначе им до берега не добраться.

Математическая особенность ситуации «путешественников в одной лодке» состояла в существовании некоторой монотонной зависимости степени достижения общей цели от вкладов путешественников в «общий котел»: чем больше туда будет вложено ресурсов, тем быстрее и легче будет достигнута общая цель [4].

Таким образом, рассматривается компромисс между экономическими системами в случае, когда каждый участник имеет критерии двух уровней: глобальный критерий верхнего уровня, относящийся к состоянию всех систем, и локальный критерий, относящийся к состоянию данной системы. Причем, критерий верхнего уровня един для всех участников.

В процессе исследований была предложена альтернативная (приведенной выше схеме компромисса на основе свёртки) схема компромисса: иерархический компромисс (при наличии метацели) между этими критериями.

Предложена схема, представляемая в виде следующей двухшаговой процедуры (игра Γ_1): вначале строится эффективное множество для локальных критериев (нижнего уровня), а затем единый глобальный критерий в интересах метаигрока оптимизируется на этом эффективном множестве.

В работе используются аналитические конструкции, в которых учитывается асимметрия в принятии решений [2].

В рамках этой теории в качестве основных характеристик иерархических систем рассматриваются следующие: а) наличие выделенного участника (Центра) системы, обладающего правом первому выбирать стратегию в зависимости от имеющейся или

предполагаемой информации о действиях подчиненных звеньев управления, и сообщать ее нижнему уровню, б) Центр осуществляет свой выбор, опираясь на принцип наибольшего гарантированного результата. Ставится задача об отыскании наилучшего поведения Центра с учетом активного поведения подчиненных систем, стремящихся к достижению собственных целей, действуя в рамках правил, устанавливаемых Центром.

Таковыми механизмами являются: распределение материальных ресурсов, выбор тарифной сетки, правил поощрений и штрафных санкций, налоговая политика, механизмы стимулирования, выдача кредитов и т.д.

Когда *Исследователь операции* принимает гипотезу, что критерии и соотношения в модели имеют линейный вид (см. в частности, описание критериев в Игре трёх стран далее), то его оптимизационная задача записывается в следующем виде.

Пусть ограниченное множество X задано системой линейных ограничений

$$Ax = b, x \geq 0,$$

где A – матрица $m \times n$, b – вектор, $x \in E^n$, и имеется k линейных функционалов

$$F_1(x) = (c_1, x), \dots, F_k(x) = (c_k, x).$$

Задача принятия решений заключается в том, чтобы найти максимум функции $F_0(x)$ на множестве Парето для функционалов $F_1(x), F_2(x), \dots, F_k(x)$, заданных на X .

Для данного случая разработаны алгоритмы расчётов, проведены доказательства их сходимости и опробованы на серии расчётов [2]. Таким образом, для данного класса задач исследователь располагают реально действующим инструментом.

Использование данного вычислительного эксперимента позволяет *Исследователю операции* на каждом шаге имитации проводить расчёты, вырабатывать локально оптимальную стратегию и сравнивать её с принятыми участниками решениями, что создаёт базу для анализа и сравнения расчётных решений с реальными действиями.

Описание объекта исследования

Рассматривается одномерный и замкнутый мир, расположенный на окружности. В таком мире расстояния удобно измерять градусами дуги. Окружность разбита на 30 одинаковых секторов по 12 градусов, и разделена на территории трех государств. Секторы нумеруются с 0 по 29. Семь из них, с 0 по 6, занимает страна В. Это развивающаяся страна со слабой экономикой, слабыми вооруженными силами и низким уровнем жизни, но обладающая некоторыми полезными ресурсами, инвестиции в которые могут быть интересны соседним странам. Еще шесть секторов с 7 по 12 занимает страна Г. Это развитая страна с сильными экономикой и армией, и высоким уровнем жизни. Оставшиеся 17 секторов с 13 по 29 занимает страна К с сильной армией, среднеразвитой экономикой и средним уровнем жизни.

Играющие участники – правительства упомянутых виртуальных стран, *Посредник*, «держатель игры», контролирует игровой процесс. В данном случае компьютерная модель является средством поддержки принятия решений, решения же на основе компьютерной модели принимаются правительствами стран. Таким образом, имитационная игра оказывается неким гибридом деловой игры и имитационной модели.

Государства могут поставлять друг другу мирную и военную продукцию по любой согласованной ими цене, размещать на своей территории производственные мощности и войска соседей, и наоборот, национализировать чужие мощности на своей территории, вступать между собой в союзы, вести войны, заключать мир. В ходе дипломатических переговоров стороны имеют право блефовать и обманывать друг друга, но *Посредник* должен знать истинные стремления всех игроков.

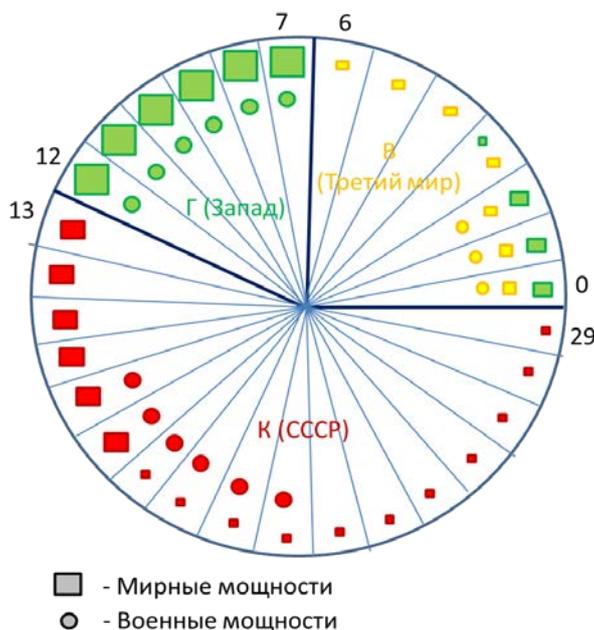


Рис. 1 – Начальное состояние стран

Гипотеза *Посредника* о целях Участников: перед коллективами игроков – правительствами стран стоит задача – повышение благосостояния своего народа, посредством максимизации функционала

$$\Phi_{\alpha} = \frac{\sum_i P_{\alpha, \text{мирный}, i, T} - \sum_i P_{\alpha, \text{мирный}, i, 0}}{\sum_i P_{\alpha, \text{мирный}, i, 0}} \rightarrow \max.$$

Игра заканчивается тогда, когда *Посредник* решает ее закончить. Момент окончания заранее не известен игрокам, чтобы исключить так называемые «концевые эффекты», один из которых широко известен благодаря крылатому выражению «После нас – хоть потоп!»

Моделируется экономика стран. Экономика состоит из двух секторов – мирного и военного. Военный сектор выпускает вооружения, которыми можно впоследствии воевать. Мирный сектор выпускает мирную продукцию, которую в дальнейшем можно инвестировать, либо в мирный сектор, либо в военный сектор. Неинвестированный мирный продукт остается в запасе. Его можно хранить, инвестировать где-то в будущем, или, например, торговать им с другими странами. Можно торговать, назначать цены, договариваться о чем угодно, можно обманывать и даже воевать.

Еще экономика интересна тем, что распределена по секторам, и в каждом секторе – свои условия хозяйствования (т.е. разные коэффициенты фондоемкости, фондоотдачи и амортизации для каждой страны). Приведем основные уравнения функционирования экономики.

$$P_{\alpha, \beta, i, t+1} = P_{\alpha, \beta, i, t} - \mu_{\alpha, \beta, i} P_{\alpha, \beta, i, t} + \rho_{\alpha, \beta, i} I_{\alpha, \beta, i, t}, \quad T_{\alpha, \beta, i, t+1} = \eta_{\alpha, \beta, i} P_{\alpha, \beta, i, t}.$$

здесь α – индекс страны, который пробегает значения G, B, K ;

β – индекс сектора экономики, который может принимать значения «мирный» и «военный»;

i – номер «географического» сектора, $0 \leq i \leq 29$;

$P_{\alpha, \beta, i, t}$ – производственные мощности;

$T_{\alpha,\beta,i,t+1}$ – выпуск продукции;

$I_{\alpha,\beta,i,t}$ – инвестиции в развитие производственных мощностей;

$\mu_{\alpha,\beta,i}$ – коэффициент амортизации;

$\rho_{\alpha,\beta,i}$ – коэффициент фондоемкости;

$\eta_{\alpha,\beta,i}$ – коэффициент фондоотдачи.

Например, лучшие природные условия для страны Г были в секторах ближе к стране К на территории В. Это соотносится с экспортом капитала в страны третьего мира. Там он дает больше всего прибыли. И некоторые мощности страны Г изначально размещены там, как показано на рисунке 1. Разрешается национализировать чужую собственность на своей территории, но это, скорее всего, вызвало бы войну.

Нельзя снижать уровень мощности в мирном секторе ниже определенного критического предела. Он разный у разных стран. У страны Г запас прочности небольшой, а у страны К, экономика которой в два раза слабее, он существенно выше, а у В, в сравнении с К и Г, запас прочности был совсем мал. И если 100 дней подряд мощности мирного сектора ниже критического уровня, то страна выбывала из игры, считалось, что народ не может так дальше жить и это правительство сметает, начинаются социальные волнения и хаос.

Страны Г и К имеют так называемое оружие повышенной мощности. Это не вполне эквивалент ядерному оружию, а что-то близкое к тактической его разновидности, оно мощное, но не испепеляющее до конца.

Можно воевать друг с другом, что означает, что вооружения сражаются на границе, сражаются не до полной победы или полного поражения.

Обычно сражаются до потери боеспособности, а когда она происходит, то понижается уровень операций, из наступления переходят к обороне, из обороны переходят к отступлению. Таким образом движется линия фронта, так идет война обычными вооружениями.

Приведем основные формулы, для моделирования боевых действий. Прежде всего, выделим три основные боевые операции: *наступление* – этой операции припишем ранг 3, *оборона* – ранг 2, и, наконец, *отход* – ранг 1. На линии фронта войска ведут боевые действия, испытывая потери в соответствии с уравнениями Осипова-Ланчестера 1 рода, [5], с учетом подвода войск к линии фронта. Коэффициенты эффективности существенно отличаются в наступлении и обороне.

$$\frac{dN}{dt} = -\beta M + X_N, \quad \frac{dM}{dt} = -\alpha N + X_M.$$

Далее приведем правила ведения боевых действий.

Боевые действия идут до потери одной из сторон психологической устойчивости [6], уменьшение которой коррелирует с увеличением относительных потерь сторон за время боя.

Потеря устойчивости понижает ранг операции стороны на единицу – образуется новое сочетание операций сторон, которые могут вызвать перемещение линии фронта.

Таблица 1 – Правила ведения боевых действий.

Сторона 1	Сторона 2	Правила
Наступление	Наступление	Потери вычисляются по уравнениям Осипова-Ланчестера, с соответствующими сторонам и рангам их операций коэффициентами эффективности α, β . Линия фронта при этом не перемещается. При потере стороной психологической устойчивости, ранг ее операции понижается на единицу, вне зависимости от управлений, заданных игроками.
Наступление	Оборона	
Оборона	Наступление	
Оборона	Оборона	
Отход	Наступление	Перемещение линии фронта со скоростью передвижения вооружений. Потерь при этом нет.
Наступление	Отход	
Оборона	Отход	Потерь и перемещения линии фронта нет. Перемещаются только вооружения.
Отход	Оборона	
Отход	Отход	

Описание проведенной игры

Приведем историю одной из игр. Поскольку эта игра с неполной информацией, важную роль играет *Посредник* – держатель игры, который собирает с игроков информацию об их управлениях и непосредственно вводит ее в компьютер. Игра заканчивается тогда, когда решит *Посредник*, чтобы не было так называемых конечных эффектов. (Часто в оптимизационных задачах на фиксированном отрезке времени можно весь ресурс выбрать сейчас, для повышения своего функционала, а что будет потом – неважно).

Игра развивалась достаточно содержательно. Началось все с переговоров между странами В и Г. На территории В были мощности Г, и В попыталась получить за них плату побольше. Но большего процента, чем рента, которую дает география, не выбьешь, иначе становится вообще невыгодно хозяйствовать. Поэтому страна Г достаточно жестко отказала. Страна В пообещала национализацию, Г пообещала начало войны. Теперь страна К начала интриговать, все время подбивая страну В на национализацию этих мощностей страны Г, говоря, что если начнется война, то они стране В помогут. На самом деле правила игры были таковы, что можно было друг друга обманывать как угодно, но на самом деле *Посредник* должен был знать правдивую информацию. Правдивая информация была в том, что К хотела поделить с Г территорию В и при этом успеть захватить мощности Г на территории В, потому что они были при границе, а потом бы торговаться с Г и за какие-то бонусы отдавать их обратно.

Страна К повела очень агрессивную политику, воевать при этом не собиралась, но создавала образ агрессора. Страна Г была самая развитая, самая мощная и предлагала конвертировать военные мощности в мирные, всю экономику перевести в мирное русло (мощности можно было конвертировать с определенными разовыми потерями), создать организацию подобно ООН, все вопросы решать мирным путем. На что страна К ответила, что это замечательное предложение, но голосовать будем пропорционально секторам. Поскольку у нее было 17 секторов из 30, на это тоже никто не мог пойти, потому что тогда все, кроме К, теряли суверенитет.

Стране К удалось вызвать опасения прежде всего у страны В, которая сумела свой страх передать правительству страны Г. Страна Г не собираясь воевать, но под влиянием страха перед агрессивной политикой страны К, которая тоже воевать не собиралась,

решила конвертировать 20 единиц своих мирных мощностей в военный сектор, чтобы уверенней противостоять К (до этого в военной области у К и Г был паритет).

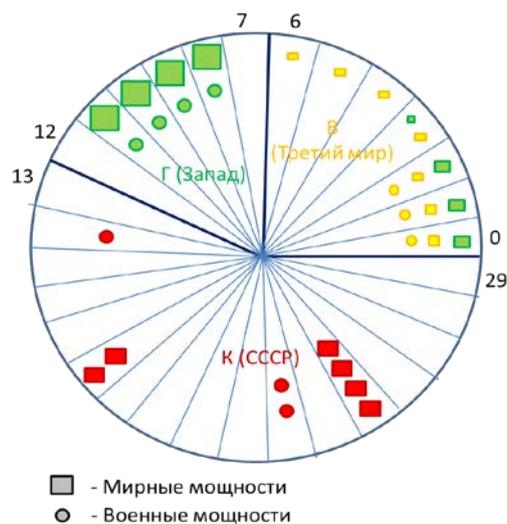


Рис. 2 – Страны после обмена ядерными ударами

Далее страна К, ориентируясь на возможный функционал, решила, что страна Г, конвертировав часть мирных мощностей в военные, навсегда потеряла возможность выиграть по возможному функционалу, т.е. мирным путем. Значит, она собирается воевать, и поэтому К первая нанесла по ней ядерный удар. Так началась война, хотя никто воевать не собирался. Перед этим К рассредоточила все свои мощности по своим секторам, перевезла их, подобно эвакуации промышленности СССР на Урал во время войны. Но от перемещения она потеряла гораздо больше мощности, чем она потеряла бы от ядерного удара.

Однако произошедший ядерный удар, поставил страну Г, что называется на счетчик. Меньше критического стал уровень ее мощностей в мирном секторе, и если бы сто дней так продолжалось, она бы выбыла из игры, как показано на рисунке. Дальше все страны стали воевать обычными вооружениями. Линия фронта продвинулась в сторону К на границе Г – К и в сторону В, на границе К – В. Страна К теснила В, а Г теснила К. Страна К воевала на два фронта, а Г на один. В итоге игроки достаточно быстро разрушили свой виртуальный мир, и, видя такое положение, *Посредник* решил игру закончить на 179 день.

Чего достигли правительства стран к концу игры? Страна В потеряла три четверти территории, 70% вооруженных сил и 7% мощностей, но тем не менее, она осталась в лучшем состоянии в смысле функционала, – и эту игру выиграла по решению *Посредника*. Страна Г потеряла 17% мощностей, 13% вооруженных сил и на 5/6 увеличила контролируемую территорию. Страна К потеряла четверть мощностей, 16% вооруженных сил и небольшой объём (1/17) территории, как показано на рисунке 3.

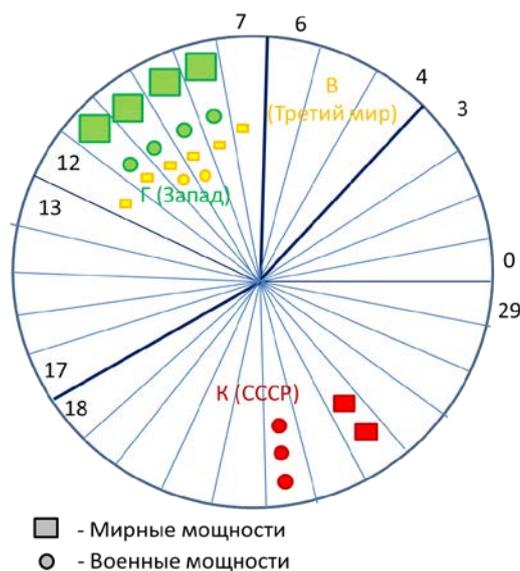


Рис. 3 – Страны в конце игры

Заключение

Определяющей в игре оказалась и квалификация игроков в области математических методов управления, и их психология и взаимоотношения между собой и в коллективе Вычислительного центра. Важным оказалось то, что игра шла медленно, не чаще раза в неделю-две что-то удавалось изменить. Но между этими событиями шли переговоры, сообщения на доске объявлений, и появились болельщики этой игры. Трудовой коллектив ВЦ интересовался игрой, разделился, болея за разные страны.

Несмотря на то, что первоначально сценарий игры задумывался на чисто материалистических, балансовых основаниях, реальное развитие переместилось в сферу информации, информатики, психологии, отношений в коллективе. Анализ итогов игры показал важность учета информационных аспектов при создании математических игровых моделей и ведение управленческих опций, доступных участникам игры. Очень важно осознать значение информационных процессов в обществе.

В целом, игра проиллюстрировала возможности имитационного моделирования для создания систем поддержки принятия решений. Гипотеза создателей игры о возможности широкого применения математических методов принятия решений для успешного анализа развития социума за счёт значительной вариативности генерации сценариев и их количественной оценки, на взгляд авторов, оправдалась.

Игра трех стран разрабатывалась на гребне холодной войны, поэтому тело моделей – экономической, военной опирались на определенные парадигмы той эпохи. Реальность показала другое – важность информационных, культурных воздействий – то, что можно отнести к «мягкой силе». Размышления о событиях недавнего прошлого и настоящего времени показывают важность развития такого рода имитационно-игровых технологий для анализа и обучения будущих руководителей. Если в результате такой работы получится, что различные аналитики, политтехнологи могут предсказать что-то – это достижение.

Как нам видится, создание подобного рода имитационных игр в настоящее время является актуальной и злободневной задачей, поскольку глобальные проблемы – геополитические, экологические, экономические и др. никуда не делись и с этим надо что-то делать, а именно их надо изучать, анализировать, принимать управленческие решения.

Настоящее исследование отражает фактически отечественный опыт создания тренажёра по имитации политико-экономико-военных взаимодействий стран. В настоящее время этот опыт чрезвычайно актуален, По убеждению авторов, математические методы управления должны найти место (например, работы [7, 8]), в том числе, и как средство поддержки принятия решений в области межгосударственных отношений.

Литература

1. **Павловский Ю.Н.** Имитационные системы и модели. М.: Знание, 1990. 46 с.
2. **Гермейер Ю.Б.** Игры с противоположными интересами. / С предисловием Н.Н. Моисеева. М.: Наука, 1976. 328 с.
3. **Гермейер Ю.Б., Ватель И.А.** Игры с иерархическим вектором интересов. // Техническая кибернетика. 1974. № 3. С. 54–69.
4. **Ватель И.А., Ерешко Ф.И.** Игры с иерархической структурой. Математическая энциклопедия, т.2, М.: Наука, 1979, С.478-482.
5. **Осипов М.П.** Влияние численности сражающихся на их потери // Военный сборник, 1915. №№ 6–9.
6. **Павловский Ю.Н.** О факторе Л.Н. Толстого в вооруженной борьбе. // Математическое моделирование. 1993. Т. 5. № 1. С. 3-15.
7. **Турко Н.И., Чемезов С.В., Ерешко Ф.И. и др.** Методология организации системы управления промышленным кластером в интересах реализации крупномасштабного регионального проекта // Технологический суверенитет в условиях новых вызовов: Материалы международной научно-практической конференции. Москва, 20 октября 2022 г. М.: РУДН, 2022. С. 10–29.
8. **Чемезов С.В.** Военно-техническое сотрудничество России с иностранными государствами: опыт организационного проектирования. М.: ЦРП МСП, 2001. 139 с.

где t_{cp} – средняя трудоемкость ремонта в данном звене системы, чел.-ч;

n – количество специалистов-ремонтников в РВО, чел.

Обработка заявок в различных звеньях системы различна в связи с неодинаковой трудоемкостью проводимого ремонта в звеньях, количества личного состава и технических средств в ремонтных бригадах, и определяется для каждого вида ВВТ и звена системы отдельно.

Время на обслуживание 1-ой заявки в системе имитационной модели и возвращения отремонтированной ВВТ в строй определяется по формуле:

$$T_b = \frac{S}{V} \quad (6)$$

где S – расстояние от места размещения ремонтного органа до района расположения подразделения, где находится отремонтированный образец ВВТ, км;

V – средняя скорость движения отремонтированного образца ВВТ, км/ч.

Заключение

Представленная имитационная модель системы восстановления позволяет осуществлять исследование процесса восстановления вышедших из строя ВВТ в любом масштабе, начиная с подразделения.

За счет имитации реальных ситуаций в имитационной модели получена возможность оценивать эффективность функционирования составляющих системы восстановления, установления степени влияния изменения параметров и начальных условий имитации на показатели эффективности в целом.

Литература

1. Автотехническое обеспечение войск. М: Воениздат, 1992. – 447с.
2. **Максимей И.В.** Имитационное моделирование на ЭВМ. М.: Радио и связь, 1988. – 232 с.
3. Надежность и эффективность в технике. Справочник. Том 1. М.: «Машиностроение», 1986. – 223 с.
4. Нормативы по танкотехническому обеспечению войск. М: Воениздат, 1986. - 208 с.
5. Справочно-методическое пособие по службе ракетно-артиллерийского вооружения. М.: ГРАУ МО РФ, 2002. – 329 с.
6. **Сурин Р.О.** Проблемы и перспективы развития системы управления техническим обеспечением в ходе проведения спецопераций / Вторая всероссийская научно-практическая конференция по имитационному моделированию и его применению в военной сфере «Имитационное моделирование систем военного назначения, действий войск и процессов их обеспечения» («ИМСВН-2022»). Труды конференции, Санкт-Петербург: ВА МТО; Москва: РИОР, 2022. – 199 с. – ISBN 978-5-369-02106-4. С. 167-172.
7. **Сурин Р.О.** Влияние эксплуатационных свойств на тактико-технические характеристики при выборе подвижных средств технического обслуживания / Совершенствование систем эксплуатации и восстановления вооружения и военной техники. Роль качества подготовки военных специалистов технического обеспечения. Материалы X Всероссийской научно-практической конференции. Омск: Омский АБИИ, 2022. С. 4-7