

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ РАБОТЫ ОТДЕЛЕНИЯ РЕАНИМАЦИИ И ИНТЕНСИВНОЙ ТЕРАПИИ НА ОСНОВЕ СТАТИСТИЧЕСКОГО ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Краснов С.В.^{1,3}, Шук Н.Н.^{1,2}

¹ Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, Самара, РФ

² Самарская областная клиническая больница им. В.Д. Середавина, Самара, РФ

³ Самарский государственный медицинский университет, Самара, РФ

E-mail: kalabus@mail.ru

Происходящие в России глубокие экономические преобразования, переход здравоохранения к новым механизмам хозяйствования, ориентация на страховую медицину придают особую актуальность совершенствованию оперативного управления ЛПУ и службами. Учитывая сложность изучаемой системы, применено математическое моделирование. Цель исследования: повышение эффективности работы отделения реанимации и интенсивной терапии за счет возможного планирования на основе изучения особенностей функционирования данного типа отделений. Методы: предложен метод статистического имитационного моделирования как частный метод математического моделирования для изучения процесса функционирования отделения реанимации и интенсивной терапии, который раньше не использовался в данном направлении. Результаты: в работе было исследовано отделение реанимации и интенсивной терапии № 2 Самарской областной клинической больницы им. В.Д. Середавина, изучен бизнес-процесс функционирования отделения, выбран усредненный процесс, произведены статистическое исследование бизнес-процесса, идентификация и оценка законов распределения. Были разработаны алгоритмы имитации на основе генератора случайных чисел для отдельных случайных величин и определены статистические показатели, которые просчитывались при реализации всех этих алгоритмов. С помощью специализированного средства AnyLogic удалось разработать модель работы отделения реанимации и интенсивной терапии, было определено и учтено в программе количество прогонов для возможности проведения экспериментов и сравнения полученных данных. Произведен эксперимент над моделью с изменением различных входящих данных. Полученные данные были проанализированы, в том числе с использованием специализированных программных средств, были выявлены определенные закономерности. Практическая значимость: предложены направления для оптимизации работы отделения, математические формулы для прогнозирования и контроля работы реанимационной службы.

Ключевые слова: имитационное моделирование, моделирование в медицине, медицинская статистика, анестезиология-реаниматология, реанимационная служба, управление в медицине, прогнозирование в медицине, общественное здоровье и здравоохранение

Введение

Оперативное управление – первый уровень в иерархии управления применительно к анестезиолого-реанимационной службе, он осуществляется заведующим отделением анестезиологии, реанимации и интенсивной терапии. Объективно оценивая состояние материальной базы, штата, объем и качество работы по анестезиологии и реаниматологии, заведующий должен в повседневной организационной деятельности приводить их в соответствие с уровнем существующих требований и затрат, поддерживать прямую и опираться в своих решениях на обратную связь по горизонтали, т. е. с другими клиническими службами, и по вертикали, в первую очередь с администрацией больницы [1].

К основным методологическим принципам науки управления относится принцип системного подхода [2]. Под системным подходом понимается метод познания, при котором исследуемые объекты представляются в виде системы, т. е. це-

лостной совокупности элементов и связей между ними. Он позволяет органически соединить анализ и синтез, качественные и количественные критерии, создает прочную основу для применения логико-математических методов и современных электронно-вычислительных средств [3]. Системный подход представляет собой процесс исследования функционирующей системы, изучения ее структуры, организации, ресурсов, различных аспектов деятельности, внутренних и внешних связей. На современном уровне менеджмента, определяемом повышением сложности объектов управления, особое место в реализации системного подхода принадлежит математическому моделированию [4]. Моделирование стационарной медицинской помощи – процесс преобразования входных переменных в выходные с целью познания и прогнозирования путей дальнейшего совершенствования и развития [5]. Различные аспекты использования математических методов в управлении лечебно-профилактическими учреждениями и стационарными служба-

ми освещены в работах С.А. Гаспаряна и соавторов, В.И. Канта и соавторов, Ю.М. Комарова, Е.Н. Шигана, В.З. Кучеренко и других отечественных ученых.

Имитационное моделирование – это частный случай математического моделирования. Существует класс объектов, для которых по различным причинам не разработаны аналитические модели либо не разработаны методы решения полученной модели. В этом случае аналитическая модель заменяется имитатором или имитационной моделью [6].

Основное достоинство метода статистического имитационного моделирования (СИМ) – его возможность учитывать случайные факторы, воздействующие на бизнес-процессы социальных и экономических систем и делающие результаты функционирования этих процессов слабо предсказуемыми. Создаваемая поведенческая модель бизнес-процесса учитывает влияние на него внутренних и внешних случайных факторов. К методу СИМ прибегают тогда, когда исследуемые процессы очень сложны и стохастичны [7].

Цель работы – повышение эффективности работы отделения реанимации и интенсивной терапии за счет возможного планирования на основе изучения особенностей функционирования данного типа отделений.

В процессе работы были поставлены и решены следующие задачи:

- Произведено исследование бизнес-процесса функционирования отделения реанимации и интенсивной терапии (изучены все бизнес-процессы, определен основной процесс, определен состав исходных данных и статистически исследован).
- Применена технология компьютерного моделирования (разработана и описана математическая модель фрагментов процесса, разработана компьютерная программа моделирования работы отделения реанимации и интенсивной терапии).
- Разработан и реализован план эксперимента с моделью. Получены результаты. Проведена технико-экономическая интерпретация результатов. Разработаны практические рекомендации по повышению эффективности работы отделения реанимации и интенсивной терапии.

Объектом изучения являлся процесс функционирования отделения реанимации и интенсивной терапии в рамках общего лечебно-профилактического процесса всего стационара и как основного элемента функционирования реанимационной службы больницы, области, округа и т. д.

Предметом изучения являлся процесс функционирования отделения реанимации и интенсивной терапии № 2 (ОРИТ № 2) Самарской областной клинической больницы (СОКБ) им. В.Д. Середавина.

Методологической основой исследования стало статистическое имитационное моделирование по условно именуемому методу Димова – Маслова (МДМ) [7] на основе технологии Монте – Карло (с помощью генератора случайных чисел создание генерации случайного процесса и изучение этого процесса). Помимо основного метода математического моделирования, в исследовании применялись аналитические методы, в том числе с использованием современных технологий обработки и анализа данных.

Исследование, описанное в работе, никогда ранее не проводилось ни в России, ни в странах бывшего СССР. Согласно изученной литературе, активная проработка теоретических основ математического моделирования стационарной помощи в нашей стране велась в 80-х годах прошлого века, а затем возобновилась в 2000-х годах. Практических работ по имитации работы анестезиологической и реанимационной службы в России до сих пор нет. Имеются работы по моделированию медицинской помощи в крупных лечебных учреждениях Европы, Израиля и Америки, но организация работы и экономические аспекты значительно отличаются от таковых в России.

Результаты исследования будут полезны всем специалистам, занимающимся организацией медицинской помощи, в значительной степени руководителям анестезиологической и реанимационной службы. Полученные данные необходимы заведующему ОРИТ № 2 и администрации больницы для планирования и оперативного управления.

Материалы и методы

Отделение реанимации и интенсивной терапии № 2 организовано в составе Регионального сосудистого центра (РСЦ) на базе Самарской областной клинической больницы им. В.Д. Середавина. ОРИТ № 2 является структурным подразделением СОКБ им. В.Д. Середавина и не имеет статуса юридического лица. Деятельность отделения реанимации и интенсивной терапии № 2 регламентируется приказами Министерства здравоохранения Российской Федерации № 919н, № 928н, № 918н, № 931н от 15 ноября 2012 года. С 2010 года отделение работало на фактически развернутых 12 койках (рисунок 1).

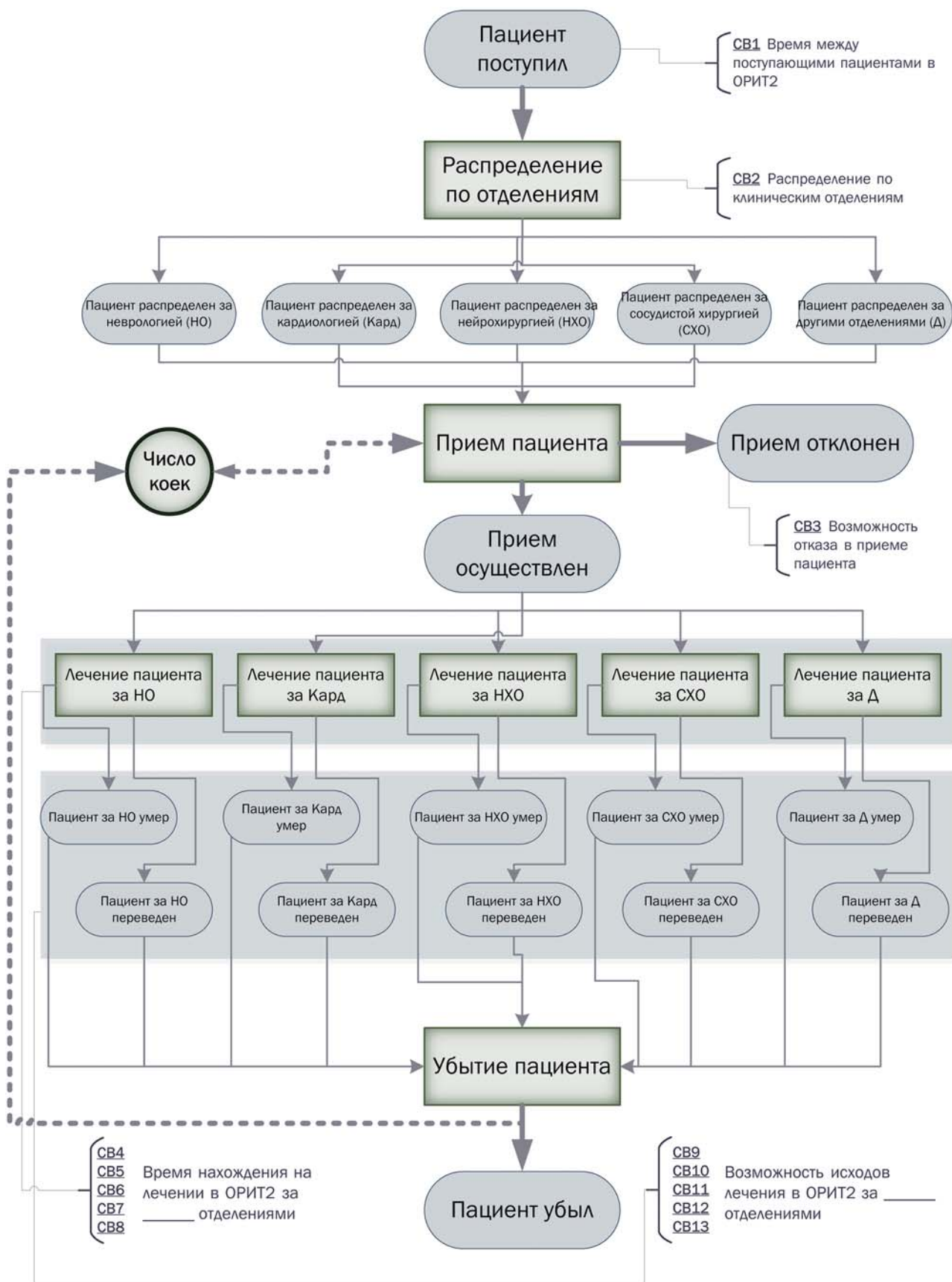


Рисунок 1. Диаграмма бизнес-процесса со случайными величинами.
 Бизнес-процесс (упрощенный для моделирования) поступления и лечения
 в условиях ОРИТ № 2 СОКБ им. В.Д. Середавина

Таблица 1. Вариант расчета параметра для СВ1 – Время между поступающими пациентами в ОРИТ № 2

№	Интервал		M _i	W _i	X _{0i}	W _i *X _{0i}	(X _{0i} -X _b) ²	D _i	Статистические показатели	
	X _i	X _{i+1}								
1	0,00	5,75	396	0,459	2,875	1,319	59,632	27,363	Число интервалов	10
2	5,75	11,50	171	0,198	8,625	1,709	3,890	0,771	Максимальное значение	57,417
3	11,50	17,25	112	0,130	14,375	1,866	14,272	1,852	Минимальное значение	0,000
4	17,25	23,00	85	0,098	20,125	1,982	90,779	8,941	Интервал	5,750
5	23,00	28,75	48	0,056	25,875	1,439	233,411	12,982	Кол. наблюдений	863
6	28,75	34,50	16	0,019	31,625	0,586	442,169	8,198	Математическое ожид.	10,597
7	34,50	40,25	18	0,021	37,375	0,780	717,051	14,956	Дисперсия	100,853
8	40,25	46,00	10	0,012	43,125	0,500	1058,058	12,260	СКО	10,043
9	46,00	51,75	4	0,005	48,875	0,227	1465,191	6,791	Параметр	0,0944
10	51,75	57,50	3	0,003	54,625	0,190	1938,448	6,739		

Таблица 2. Проверка гипотезы соответствия закона распределения с найденным параметром с помощью критерия Хи-квадрата для СВ1 – время между поступающими пациентами в ОРИТ № 2

№	X _i	X _{i+1}	λX _i	λX _{i+1}	exp(-λX _i)	exp(-λX _{i+1})	P _i	M _i	NP _i	M _i -NP _i	(M _i -NP _i) ² /NP _i
1	0,00	5,75	0,000	0,543	1,000	0,581	0,419	396	361,392	34,608	3,3141
2	5,75	11,50	0,543	1,085	0,581	0,338	0,243	171	210,055	-39,055	7,2613
3	11,50	17,25	1,085	1,628	0,338	0,196	0,141	112	122,092	-10,092	0,8341
4	17,25	23,00	1,628	2,170	0,196	0,114	0,082	85	70,964	14,036	2,7761
5	23,00	28,75	2,170	2,713	0,114	0,066	0,048	48	41,247	6,753	1,1056
6	28,75	34,50	2,713	3,256	0,066	0,039	0,028	16	23,974	-7,974	2,6524
7	34,50	40,25	3,256	3,798	0,039	0,022	0,016	18	13,935	4,065	1,1860
8	40,25	46,00	3,798	4,341	0,022	0,013	0,009	10	8,099	1,901	0,4460
9	46,00	51,75	4,341	4,883	0,013	0,008	0,005	4	4,708	-0,708	0,1064
10	51,75	57,50	4,883	5,426	0,008	0,004	0,003	3	2,736	0,264	0,0254
Хи-квадрат критический (по таблице)							20,1	Хи-квадрат наб.		19,707	

В отделение реанимации и интенсивной терапии № 2 подлежат госпитализации пациенты со всеми вариантами острых нарушений мозгового кровообращения (ОНМК) (ишемический инсульт, геморрагический инсульт, субарахноидальное кровоизлияние, транзиторная ишемическая атака); острым коронарным синдромом (с подъемом и без подъема сегмента ST, острым инфарктом миокарда и нестабильной стенокардией) в первые сутки заболевания. Также осуществляется ведение пациентов после неотложных и отсроченных рентгенэндоваскулярных и открытых вмешательств на коронарных артериях.

Отделение реанимации является вспомогательным подразделением стационара, оказывает круглосуточную медицинскую помощь взрослому населению по профилю «анестезиология и реаниматология», работа отделения связана с работой клинических, профильных отделений.

Пациент доставляется в стационар бригадой скорой помощи, на уровне приемного покоя про-

водится диагностика, и пациент закрепляется за конкретным отделением по профилю заболевания, в которое направляется для лечения, в дальнейшем, после проведенного лечения, пациент выписывается из больницы. Если на различных этапах пребывания пациента в стационаре состояние его ухудшается или требуются повышенное наблюдение и лечение, то данный пациент направляется на лечение в отделение реанимации. ОРИТ № 2 является специализированным отделением, работает в основном на отделения, которые ведут круглосуточный экстренный прием. При отсутствии мест в данной реанимации пациенты направляются на лечение в реанимацию общего профиля. После проведенного лечения в условиях реанимации пациенты направляются на дальнейшее лечение в клиническое отделение.

Длительность пребывания пациента на реанимационной койке зависит от множества факторов, но самый основной – область и фактор поражения, что и определяет закрепление

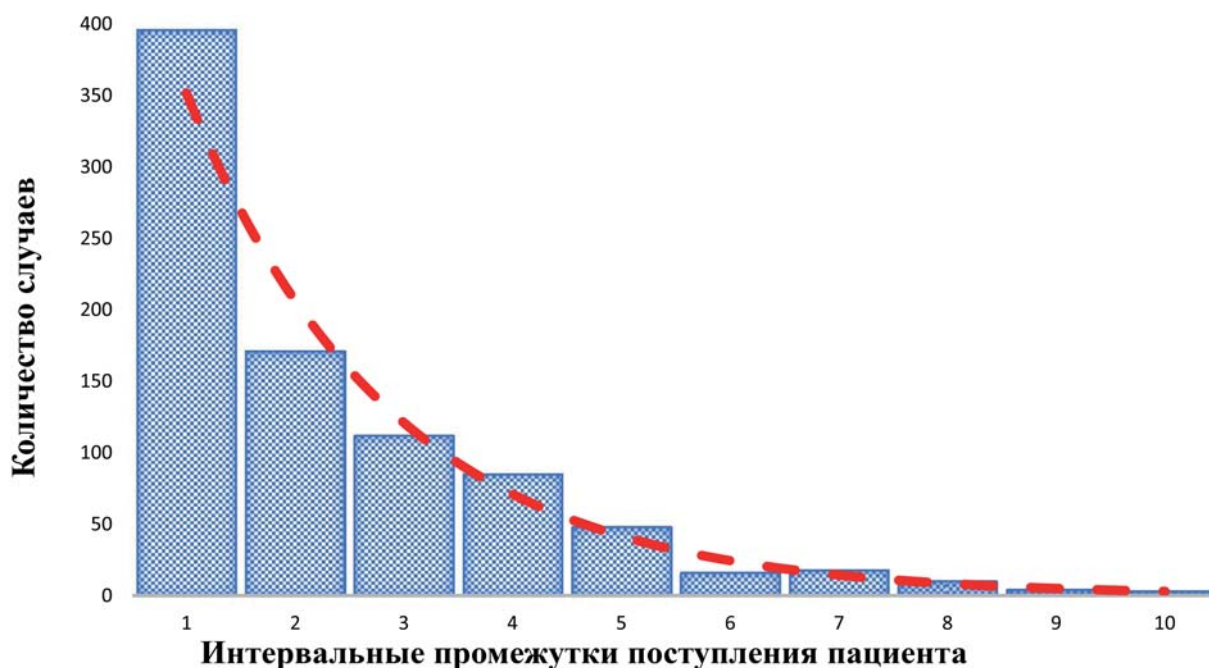


Рисунок 2. Гистограмма частот времени между поступающими пациентами
(Линия тренда – экспоненциальная, схематичная)

Таблица 3. Случайные величины для моделирования

	Название	Тип	В модели
CB1	Время между поступающими пациентами в ОРИТ № 2	Непрерывная	$t_{next\ patient} = -1/\lambda * \ln(\text{rand}(0;1)), \lambda = 0,0944$
CB2	Распределение по клиническим отделениям	Дискретная	$P_{nd} = 0,580; P_{card} = 0,271; P_{nsd} = 0,057; P_{vsd} = 0,064; P_{od} = 0,02$
CB3	Возможность отказа в приеме	Дискретная	Алгоритм
CB4	Время нахождения пациента на лечении в ОРИТ № 2, закрепленного за профильным отделением неврологии	Непрерывная	$t_{patient\ nd} = -1/\lambda_{nd} * \ln(\text{rand}(0;1)), \lambda_{nd} = 0,0064$
CB5	Время нахождения пациента на лечении в ОРИТ № 2, закрепленного за профильным отделением кардиологии	Непрерывная	$t_{patient\ card} = -1/\lambda_{card} * \ln(\text{rand}(0;1)), \lambda_{card} = 0,0318$
CB6	Время нахождения пациента на лечении в ОРИТ № 2, закрепленного за профильным отделением нейрохирургии	Непрерывная	$t_{patient\ nsd} = -1/\lambda_{nsd} * \ln(\text{rand}(0;1)), \lambda_{nsd} = 0,0056$
CB7	Время нахождения пациента на лечении в ОРИТ № 2, закрепленного за профильным отделением сосудистой хирургии	Непрерывная	$t_{patient\ vsd} = -1/\lambda_{vsd} * \ln(\text{rand}(0;1)), \lambda_{vsd} = 0,0239$
CB8	Время нахождения пациента на лечении в ОРИТ № 2, закрепленного за другими профильными отделениями	Непрерывная	$t_{patient\ od} = -1/\lambda_{od} * \ln(\text{rand}(0;1)), \lambda_{od} = 0,0242$
CB9	Возможность исходов лечения в ОРИТ № 2 пациентов, закрепленных за профильным отделением неврологии	Дискретная	$\frac{P_{e\ nd}}{P_{nd\ d}} > 0,305$
CB10	Возможность исходов лечения в ОРИТ № 2 пациентов, закрепленных за профильным отделением кардиологии	Дискретная	$\frac{P_{e\ card}}{P_{card\ d}} > 0,107$
CB11	Возможность исходов лечения в ОРИТ № 2 пациентов, закрепленных за профильным отделением нейрохирургии	Дискретная	$\frac{P_{e\ nsd}}{P_{nsd\ d}} > 0,245$
CB12	Возможность исходов лечения в ОРИТ № 2 пациентов, закрепленных за профильным отделением сосудистой хирургии	Дискретная	$\frac{P_{e\ vsd}}{P_{vsd\ d}} > 0,055$
CB13	Возможность исходов лечения в ОРИТ № 2 пациентов, закрепленных за другими профильными отделениями	Дискретная	$\frac{P_{e\ od}}{P_{od\ d}} > 0,167$

пациента за определенным профильным клиническим отделением.

Наличие или отсутствие мест в реанимации будет зависеть от времени самого поступления и длительности пребывания пациентов, а длительность, в свою очередь, будет зависеть от профиля заболевания.

Учитывая вышеописанное и исходя из целей и задач проекта, бизнес-процесс был упрощен и видоизменен для оптимального моделирования, рисунок 1.

Исходные данные для проекта получены из прототипа медицинской информационной системы [8–10], которая разрабатывалась в 2015 году и представляла собой электронную таблицу MS Excel, которая повторяла «журнал движения пациентов», заполняемый в «бумажном» варианте.

Произведено статистическое исследование бизнес-процесса, изучено 13 случайных величин, произведена идентификация законов распределения, а также их оценка с помощью критерия согласия Пирсона (расчет проводился в Excel в составе пакета MS Office версии 16.), таблицы 1, 2.

Выявлено, что все временные характеристики процесса СВ1, СВ4–СВ8, отличающиеся между собой одним параметром, имеют экспоненциальный закон распределения. Вероятность ошибки, полученной в результате проверки гипотез, отвечает требованию имитационного моделирования (уровень значимости – 0,01). Дискретные случайные величины были заданы с помощью таблиц вероятностей на основании расчетов отношений частных случаев к общим. Произведено предварительное выражение данных величин через генератор случайных чисел, $\text{rand}(0;1)$, таблица 3.

Реализация моделирующего алгоритма возможна в различных средах разработки, множество современных языков программирования имеют библиотеки для реализации имитационного моделирования. Несомненно, данный способ имеет свои плюсы, но требует больших затрат и опасен накоплением ошибок во вспомогательных алгоритмах, которые сложно будет обнаружить [11]. Поэтому было решено остановиться на специализированных средствах. Среда имитационного моделирования AnyLogic – программный инструмент отечественной разработки, объединивший методы системной динамики, «процессного» дискретно-событийного и агентного моделирования в одном языке Java и в одной среде разработки СИМ-моделей [12; 13] (AnyLogic версия 8.3).

Алгоритм был реализован с использованием стандартных блоков. Основными строительными блоками модели AnyLogic являются активные объекты, которые позволяют моделировать любые объекты реального мира, рисунок 3.

На основе учебной версии AnyLogic произведено программирование отдельных блоков с программированием основных статистических показателей работы отделения.

Для работы с моделью произведено распределение рабочего пространства на отдельные участки. Есть возможность изменения всех входящих параметров в любое время имитационного процесса.

Выполненная модель позволяет проводить различные эксперименты, изменяя исходные параметры. Но каждый эксперимент проводится в случайном режиме, т. е. все случайные величины задаются генераторами случайных чисел и выходные данные получаются разные с большой вариацией. Для интерпретации результатов и влияния параметров на эти результаты необходимо иметь и сравнивать средние показатели.

Крайне важным является вопрос, сколько экспериментов следует провести, чтобы можно было доверять полученным характеристикам. Если экспериментов недостаточно, то характеристика недостоверна. Обычно исследователь задает доверительную вероятность, то есть вероятность, с которой он готов доверять снятым характеристикам. Чем больше будет задана доверительная вероятность, тем больше экспериментов потребуется сделать.

Оценка основывалась на центральной предельной теореме, утверждающей, что сумма (или среднее) случайных величин есть величина неслучайная. При достаточно большом количестве экспериментов эмпирические характеристики будут стремиться к теоретическим [14].

Для расчета использовалась формула, основанная на обратной функции Лапласа. Необходимо 50 прогонов, чтобы с вероятностью более 90 % сказать, что экспериментальная величина с доверительным интервалом 0,1 попадет в теоретическую область. Модельное время с одного года было увеличено до 50 лет, и, соответственно, показатели, в которых идет расчет суммы, разделены на 50, средние показатели остались в неизменном виде.

Работа модели сравнивалась с реальными статистическими данными работы отделения в 2016–2018 годах. Учитывая то, что в течение этих лет менялась структура поступающих пациентов, показатели работы имитационной модели с кор-

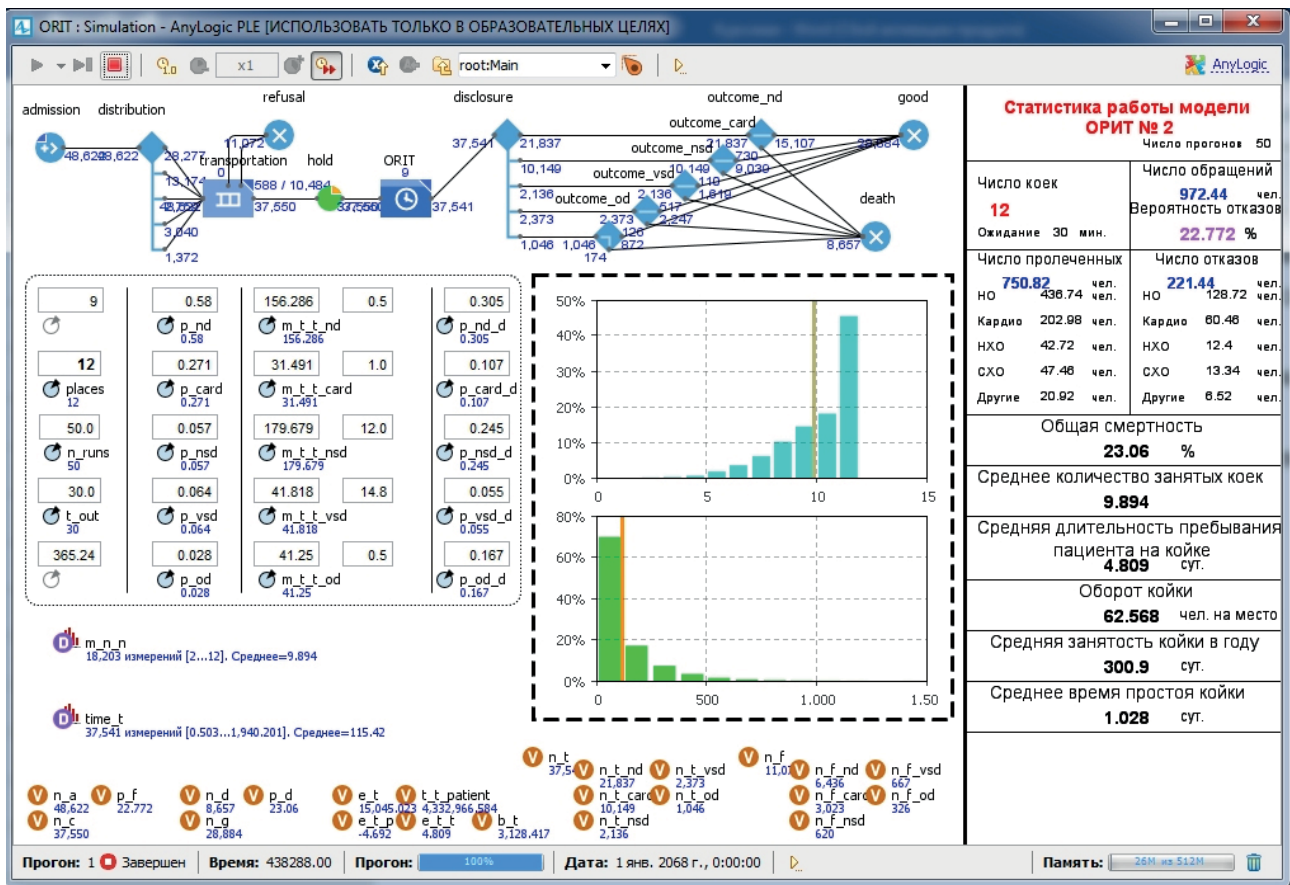


Рисунок 3. Вид модели в программе AnyLogic

рекция структуры входящего потока полностью соответствовали реальным данным.

Результаты

По мнению различных авторов, в числе основных показателей, отражающих интенсивность деятельности ОРИТ, должен быть показатель занятости реанимационной койки. Если взять за основу экономический подход, среди функциональных задач оперативного управления руководства анестезиолого-реанимационной службы одной из ведущих можно считать задачу обеспечения интенсивного использования реанимационной койки. С учетом специфики организационных требований (сохранение резервных коек для срочной госпитализации, приоритет реанимационной асептики и др.) нормативными можно считать ритм работы реанимации общего профиля с занятостью койки 280–320 дней в году [15]. Низкие показатели могут говорить о неэкономичном использовании реанимационных коек, превышение данного показателя говорит о высокой загруженности отделения, о больших нагрузках на персонал, о возможных проблемах, связанных с дальнейшей инфекционной безопасностью.

Согласно публикациям Н.Н. Моисеева, медицинская система является нерелефторной слож-

ной системой, и поиск оптимальных решений на основе принципа максимума невозможен [16]. В работе использовалось «квазиоптимальное управление», предложенное авторами статистического имитационного моделирования по версии Маслова – Димова [17].

Произведено более 400 прогонов модели (имитаций годовой работы отделения реанимации). Смоделированы различные варианты работы отделения, которые мы не смогли бы осуществить при настоящем эксперименте над реальным процессом. Данные, полученные при моделировании, анализировались с помощью интеллектуальных средств, таких как Deductor Studio, версия 5.3.

Эксперимент по изменению числа коек. Для оптимальной работы отделения реанимации необходимо 12 коек, увеличение числа коек приведет к «простою коек» и неэффективному их использованию, причем оптимальный поток должен быть довольно высоким с неизбежным числом отказов до 20 %, что, в свою очередь, для администрации создаст дополнительные вопросы по оказанию помощи данным пациентам. На рисунке 4 представлена диаграмма прогонов модели с различным числом коек с одинаковым числом обращений пациентов.

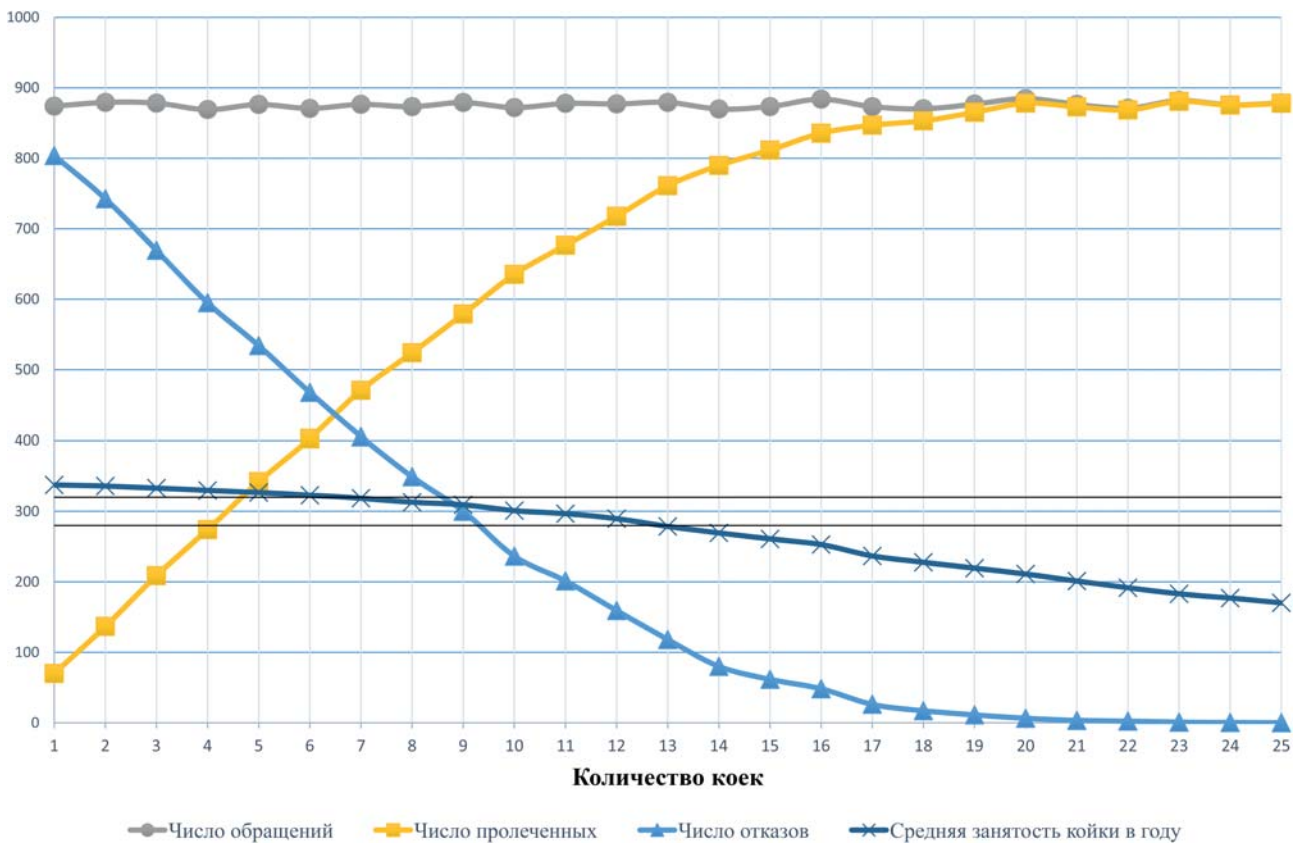


Рисунок 4. Диаграммы влияния числа койк на основные статистические показатели при интенсивности потока в среднем 8,8 часа между поступающими пациентами (левая шкала – единицы измерения статистических показателей, черными линиями обозначен коридор средней занятости койк 280–320)

Эксперимент по изменению интенсивности потока. Не удалось создать поток и получить конечное число пролеченных пациентов при увеличении потока: число пролеченных так же увеличивалось при каждом увеличении интенсивности потока. Ограничения учебной версии программы AnyLogic не позволило максимально увеличить интенсивность потока до «остановки» цифры числа пролеченных пациентов. Конечно, результат высокой эффективности работы отделения – это высокое число отказов, что потребует от администрации дополнительных решений по лечению данной категории пациентов.

Эксперимент по изменению ожидания в очереди. При моделировании процесса была заложена возможность наличия очереди из одного человека как имитация транспортировки и обследования пациента от приемного покоя до отделения реанимации. Произведено изменение ожидания в очереди от 0 до 60 минут. Изменение данного показателя не повлияло на изменение других показателей. 60 минут – промежуток довольно малый, чтобы повлиять на число пролеченных пациентов со средним временем пребывания 4,7 суток. Хотя при наличии большего числа пациентов с пребыванием, соизмеримым с данным временным

промежутком, это изменение могло бы повлиять на все статистические показатели. Но пациенты с малым пребыванием в условиях реанимации должны быть организационно отведены в противошоковые палаты приемного покоя или палаты пробуждения при анестезиологических отделениях.

Эксперимент по изменению структуры поступающих пациентов. На представленной модели было произведено изменение структуры пациентов с изменением соотношения числа пациентов, поступающих за отделением неврологии и кардиологии. Получились довольно интересные данные, которые показали следующее: при изменении структуры в сторону преобладания кардиологических пациентов, которые по сравнению с неврологическими пациентами находятся на койках меньшее время и с низкой летальностью, заметно увеличилось число пролеченных пациентов, оборот койки, произошло уменьшение общей летальности, числа отказов и среднего пребывания на реанимационной койке. Данные показатели будут оптимальны для администрации, но средняя занятость койки в году снижается, что скажется на эффективности, экономичности использования реанимационных койк.

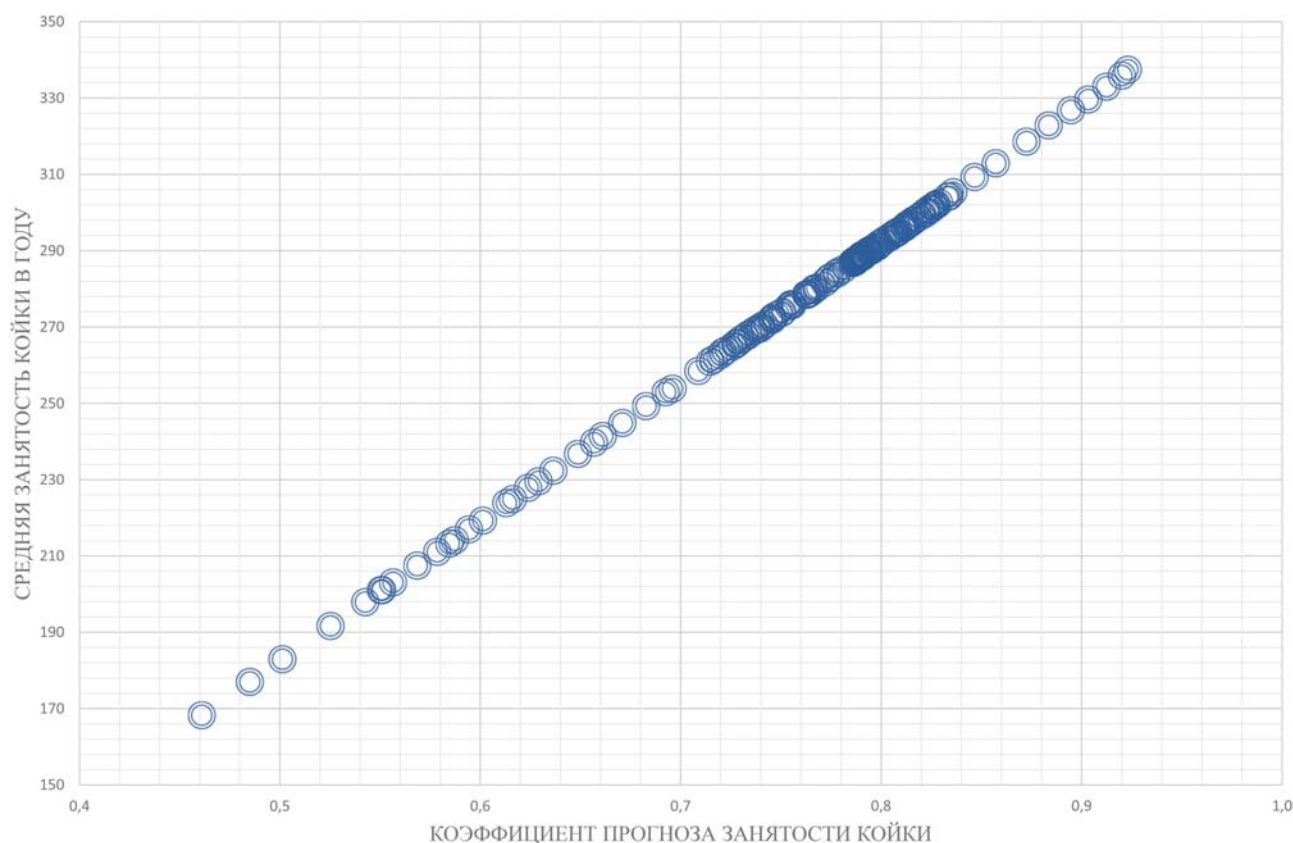


Рисунок 5. Анализ зависимости «коэффициента прогноза занятости койки» от средней занятости койки в году

Эксперимент по изменению времени нахождения пациентов на лечении в реанимации, закрепленных за профильным отделением неврологии. В результате данного эксперимента на фоне уменьшения пребывания пациентов на реанимационной койке, увеличения числа пролеченных и оборота коек снижались показатели средней занятости койки в году, что, в свою очередь, неэкономично. Есть возможность увеличения общего потока и, как следствие, числа пролеченных пациентов за год.

Эксперимент по изменению летальности пациентов, закрепленных за профильным отделением неврологии. При изменении летальности пациентов, закрепленных за профильным отделением неврологии, в разы менялись показатели общей летальности, т. к. данный контингент пациентов составляет общую массу всех пациентов. Не исключено, что с уменьшением количества смертей может увеличиться средняя продолжительность нахождения пациента на реанимационной койке, что может уменьшить число пациентов, прошедших через отделение реанимации, и отношение к меньшему числу увеличит показатель общей летальности, данный факт не был заложен в алгоритм имитации.

Коэффициент прогноза занятости коек. В программе был заложен алгоритм, учитыва-

ющий, что на «счетчик» каждый день в 8.00 поступает число занятых мест в реанимации, что в принципе учитывается реально при составлении формы № 7, а также каждый день при докладе администрации, или заведующему отделением, или оперативным службам города. Данные показатели складывались, сумма делилась на количество дней, т. е. получалось среднее значение. Было произведено деление среднего количества занятых коек на общее количество коек, получился определенный коэффициент «X», формула (1). Далее представлен график зависимости данного коэффициента и средней занятости койки в году (рисунок 5).

$$X = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{\text{Число занятых коек}}{\text{Число развернутых коек}} \right), \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \text{Средняя занятость койки в году } (E_t) = \\ = 365,303 * X - 0,190. \end{aligned} \quad (2)$$

Явная линейная зависимость данного коэффициента и средней занятости койки в году, формула (2). По коэффициентам, рассчитанным с помощью статистических программ (пакет «статистика» MS Excel версия 16), показатели корреляции, стремятся к единице.

С использованием данного коэффициента мы можем предсказать, какая будет средняя занятость койки в году на текущий момент. Точность

	В	С
2	Прогнозирование работы	
3	Общее число коек	12
4	Средняя длительность пребывания пациента на койке	4,9
5	Средняя занятость коек в году	337
6	Число пролеченных пациентов	827

Приложение 7

Основные статистические показатели работы отделения по годам

Показатели работы	2016	2017	2018
Кол-во госпитализаций	822	830	887
Общее кол-во койко-дней	3890	3942	3957
Оборот койки	67,0	69,1	73,9
Работа койки в году	326	337	329,8
Количество умерших	168	191	213
Летальность	22,6%	23%	24%
Среднее кол-во койко-дней	4,6	4,9	4,5

Рисунок 6. Работа модели прогнозирования. Сравнение с реальными данными.

Слева формула в виде алгоритма в табличном редакторе MS Excel

данного показателя будет зависеть от числа дней, но при ежедневном сборе и расчете показателя, через 2–3 месяца работы отделения мы сможем примерно сказать, какая средняя занятость койки в году будет. При наличии в медицинской организации нескольких подразделений реанимаций мы сможем сравнить их работу и при наличии явных отклонений корректировать их работу в текущем режиме.

Применение других методов моделирования на основе полученных модельных данных. Учитывая ограничения учебной версии программы AnyLogic с предельным числом генерируемых «агентов», нам не удалось создать поток с максимальной интенсивностью для модели и получить конечные результаты, но для руководства больницы и для руководителя отделения важно предельное число пациентов, которое может пролечить отделение за год. Для получения данных результатов предпринята попытка создать линейную регрессионную модель. Модель линейной регрессии является часто используемой и наиболее изученной в эконометрике.

Модель множественной линейной регрессии (или коротко – множественная линейная регрессия) предназначена для проверки и изучения связи (объяснения поведения) между одной зависимой переменной (эндогенной) и несколькими независимыми (экзогенными) переменными.

Для построения регрессионной модели необходимы статистические данные. Использовать реальные данные невозможно, отделение суще-

ствует всего 10 лет, причем первые 3 года работы были в условиях определения и становления помощи пациентам с сосудистыми заболеваниями. Для построения модели воспользовались данными, полученными в результате работы имитационной модели. Выходной параметр – «Число пролеченных», входные параметры – «Среднее количество занятых коек», «Средняя длительность пребывания пациента на койке». Алгоритм поиска коэффициентов в Deductor, версия 5.3, – метод наименьших квадратов.

В результате работы программы удалось найти коэффициенты и построить модель зависимости с очень высокой степенью достоверности (коэффициенты корреляции и детерминации приближаются к единице Deductor, версия 5.3), формула (3).

Если учесть, что в течение года общее число коек не менялось, то, используя формулу, описанную выше, уравнение зависимости можно преобразовать, формула (4).

Формула разрабатывалась на основе модельных данных. Моделирование на количестве коек меньше 6 практически не проводилось, и, соответственно, формула применима для расчетов с количеством коек больше 6.

Мы получили удобную модель для прогнозирования работы отделения, сравним с реальной статистикой, рисунок 6.

$$N_{t} = 740,96 + 75,72 * E_{n} - 153,51 * E_{t,t}, \quad (3)$$

$$N_{-t} = 740,96 + \frac{75,72 * n * (E_{-t} + 0,19)}{365,303} - 153,51 * E_{-t} \quad (4)$$

где N_{-t} – число пролеченных пациентов за год; E_{-n} – среднее количество занятых коек; E_{-t} – средняя длительность пребывания на койке; N_{-t} – число пролеченных пациентов за год; E_{-t} – средняя занятость койки в году; n – общее число коек; E_{-t} – средняя длительность пребывания на койке.

Обсуждение

В работе было исследовано отделение реанимации и интенсивной терапии № 2 СОКБ им. В.Д. Середавина, изучен бизнес-процесс функционирования отделения, выбран усредненный процесс, произведены статистические исследования бизнес-процесса, идентификация законов распределения, оценка этих законов распределения. Были разработаны алгоритмы имитации на основе генератора случайных чисел для отдельных случайных величин, определены статистические показатели, которые можно будет просчитать при реализации всех этих алгоритмов. С помощью специализированного средства AnyLogic удалось разработать модель работы отделения реанимации и интенсивной терапии, было определено и учтено в программе количество прогнозов для возможности проведения экспериментов и сравнения полученных данных. Произведен эксперимент над моделью с изменением различных входящих данных, что невозможно было сделать на реальном объекте. Полученные данные были проанализированы, в том числе с использованием специализированных программных средств, были выявлены определенные закономерности.

На основании проделанной работы можно сделать следующие выводы:

- Количество пролеченных пациентов, а также общая летальность, средняя длительность пребывания в реанимации и оборот койки зависят от контингента пациентов, которые находятся в реанимации. Использование данных показателей для оценки работы отделений реанимаций нецелесообразно. Как описывал автор [15], для оценки и сравнения работы и экономические расчеты должны проводиться по «средней занятости койки в году».

- В результате испытания модели можно предположить: для оптимального использования реанимационных коек необходимо создать высокий поток, в результате которого неизбежно появятся пациенты, которые не смогут попасть

на лечение в данную реанимацию из-за отсутствия мест. Необходимо другое реанимационное подразделение для лечения данных пациентов. *Экономически оптимально будет использовать несколько 12-кочных специализированных реанимаций, чем отделения свыше 20 коек.* Например, несколько 12-кочных специализированных реанимаций с разнородными потоками пациентов смогут на время взять на лечение «отказных» пациентов, а затем перераспределить по профилю. Для доказательства данного утверждения необходимо знать весь контингент поступающих пациентов в стационар и затраты на содержание реанимационной койки и создание модели всей реанимационной службы.

- «Коэффициент прогноза занятости койки» можно использовать для прогнозирования средней занятости койки в году в текущем режиме. *Количество занятых коек по форме № 7, их среднее число за определенный период, разделенное на число развернутых коек, умноженное на число дней в году.* Можно предположить, что данный коэффициент можно использовать для прогноза работы всего стационара, необходимы исследования для уточнения данных возможностей. «Коэффициент прогноза занятости койки» можно «встроить» в медицинские информационные системы стационара, а также в городские экстренные службы для оперативного перераспределения потока реанимационных пациентов.

- Зависимость и уравнение зависимости прогнозирования «числа пролеченных пациентов», которые были найдены на основе модельных данных методом линейной регрессии, являются уникальным инструментом в планировании работы службы как непосредственно заведующим отделением, так и администрацией всего стационара и руководителем службы всего города или области. Испытание данной модели и сравнение с реальными статистическими показателями работы отделения показали высокую эффективность работы модели (формулы).

Анализируя данную формулу, для увеличения числа пролеченных пациентов за год необходимо обратить внимание на уменьшение средней длительности пребывания на реанимационной койке в большей степени, чем пытаться увеличить общий коечный фонд отделения. Вероятно, экономически и для всего стационара это будет более выгодно с учетом высоких затрат на содержание реанимационных коек.

Выводы

В результате проделанной работы нам удалось изучить возможности работы Отделения реани-

мации и интенсивной терапии № 2 Самарской областной клинической больницы им. В.Д. Середавина. Все пункты, изложенные выше, с большой вероятностью имеют отношение к любым подразделениям реанимаций, применение этих знаний на практике поможет правильно планировать и контролировать работу реанимационной службы как администрации медицинского учреждения, так и руководителям отдельных реанимационных подразделений, что, в свою очередь, повысит эффективность их работы.

Разработанные алгоритмы (моделирующий алгоритм, формулы по расчету «коэффициента прогноза занятости коек» и «числа пролеченных пациентов за год» можно встроить в медицинскую информационную систему как отделения, так и стационара и оперативных служб города или области. Полученные модели могут стать основой для разработки систем помощи в принятии решений [18; 19]. Определено дальнейшее направление для исследований в данной области.

Системный подход представляет собой концептуальный базис науки управления, для конкретного применения в оперативном управлении требуется его производная – системный анализ. Являясь, в сущности, методологией обоснования управленческих решений, системный анализ помогает руководителю в сфере здравоохранения на любом уровне строго объективно подходить к оценке возможных вариантов решений, прогнозировать и оценить результаты управленческих решений с помощью медицинских, экономических и других критериев [20].

Литература

1. Недашковский Э.В. Оперативное управление анестезиолого-реанимационной службой больницы на основе системного подхода и компьютеризации // *Анестезиология и реаниматология*. 1988. № 6. С. 54–58.
2. Блауберг И.В., Юдин Э.Г. Становление и сущность системного подхода. М.: Наука, 1973. 173 с.
3. Балтабаев Т.Е. Мониторно-компьютерная система отделения реанимации // *Реализация математических методов с использованием ЭВМ в клинической и экспериментальной медицине: сб. мат. II Всесоюзной конференции*. 1986. С. 46–48.
4. Кант В.И. Математические методы и моделирование в здравоохранении М.: Медицина, 1987. 224 с.
5. Кант В.И., Кучеренко В.З. Системный подход и моделирование в организации стационарной медицинской помощи // *Стационарная медицинская помощь (основы организации) / под ред. А.Г. Сафонова, Е.А. Логиновой*. М.: Медицина, 1989. С. 65–80.
6. Димов Э.М., Маслов О.Н. О развитии математических принципов метода имитационного моделирования // *Инфокоммуникационные технологии*. 2003. Т. 1, № 2. С. 5–11.
7. Динамика разработки имитационной модели бизнес-процесса / Э.М. Димов [и др.] // *Инфокоммуникационные технологии*. 2013. Т. 11, № 1. С. 63–78.
8. Goldstein R., Mulley A. Use of a computerized data base for outcome analysis of a medical intensive care unit // *Proceeding: 4th Annual Symposium Computer Application Medical Care*. 1980. Vol. 1–3. P. 1084–1086.
9. Heck E., Koller C., Knapp R. An interactive intensive care unit information system // *Proceeding: Computer Cardiology 8th Meeting*. 1981. P. 243–245.
10. Малахов И.А., Матвеева Е.А., Шук Н.Н. Практические особенности проектирования медицинской информационной системы для отделений реанимаций и интенсивной терапии // *Инфокоммуникационные технологии*. 2019. Т. 17, № 1. С. 115–122. DOI: <https://doi.org/10.18469/ikt.2019.17.1.17>
11. Димов Э.М., Маслов О.Н., Трошин Ю.В. Выбор средств программного обеспечения статистического имитационного моделирования // *Инфокоммуникационные технологии*. 2015. Т. 21, № 2. С. 132–139.
12. Мухин О.И. Моделирование систем: курс лекций. Пермский государственный технический университет. URL: <http://stratum.ac.ru/education/textbooks/modelir.html> (дата обращения: 02.04.2019).
13. Сравнение систем структурного и имитационного моделирования AnyLogic, Extendsim, Simulink / А.П. Кирпичников [и др.] // *Вестник технологического университета*. 2017. Т. 20, № 15. С. 118–122.
14. Борщёв А.В. Имитационное моделирование: Состояние области на 2015 год, тенденции и прогноз // *Имитационное моделирование. Теория и практика: сб. труд. седьмой Всероссийской научно-практической конференции*. 2015. С. 14–22.
15. Гольцев Г.В., Гордон Ю.Н., Давыдова Ф.Б. Интенсификация использования коечного фонда // *Советское здравоохранение*. 1984. № 12. С. 28–32.

16. Моисеев Н.Н. Элементы теории оптимальных систем. М.: Наука, 1975. 528 с.
17. Димов Э.М., Маслов О.Н. Алгоритмизация квазиоптимального управления нерелекторными системами с применением статистического имитационного моделирования // Инфокоммуникационные технологии. 2017. Т. 15, № 3. С. 205–217. DOI: <https://doi.org/10.18469/ikt.2017.15.3.01>
18. Димов Э.М., Маслов О.Н., Трошин Ю.В. Снижение неопределенности выбора управленческих решений с помощью метода статистического имитационного моделирования // Информационные технологии. 2014. № 6. С. 51–57.
19. Сравнительная эффективность методов и средств информационной поддержки управленческих решений / Д.П. Ануфриев [и др.] // Инфокоммуникационные технологии. 2014. Т. 12, № 1. С. 54–67.
20. Недашковский Э.В. Оперативное управление анестезиолого-реанимационной службой многопрофильной больницы. Архангельск: СГМУ, 2009. 200 с.

Получено 23.08.2022

Краснов Сергей Викторович, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой медицинской физики, математики и информатики Самарского государственного медицинского университета. 443099, Российская Федерация г. Самара, ул. Чапаевская, 89. Тел. +7 846 374-10-04. E-mail: krasnovtlt@mail.ru

Шук Николай Николаевич, врач-анестезиолог-реаниматолог отделения реанимации и интенсивной терапии № 2 Самарской областной клинической больницы им. В.Д. Середавина, аспирант кафедры прикладной информатики Поволжского государственного университета телекоммуникаций и информатики. 443095, Российская Федерация, г. Самара, ул. Ташкентская, 159. Тел. +7 987 983-75-45. E-mail: kalabus@mail.ru

FORECASTING WORK OF INTENSIVE CARE UNIT ON THE BASIS OF STATISTICAL SIMULATION

Krasnov S.V.^{1,3}, Shuk N.N.^{1,2}

¹ *Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, Samara, Russian Federation*

² *Samara Regional Clinical Hospital, Samara, Russian Federation*

³ *Samara State Medical University, Samara, Russian Federation*

E-mail: kalabus@mail.ru

The profound economic transformations taking place in Russia, the transition of health care to new management mechanisms, and the focus on insurance medicine give special actuality to improving the operational management of medical and prophylactic institutions and related services. Given the complexity of the system under study, a mathematic simulation was applied. Study purpose: To increase the efficiency of the resuscitation and intensive care unit through possible planning, based on studying the features of the functioning of this type units. Methods: A method of statistical simulation is proposed as a particular method of mathematical modeling for studying the functioning of the resuscitation and intensive care unit, which was not previously used in this direction. Results: During the work, the intensive care unit no. 2 of the Samara Regional Clinical Hospital named after V.D. Seredavin and the business process of the department's functioning were studied, an averaged process was selected, a statistical study of the business process was carried out, and the distribution laws were identified and evaluated. Some simulation algorithms were developed based on a random number generator for individual random variables, and some statistical indicators were determined, which were calculated during implementation of all these algorithms. Using the specialized AnyLogic tool, we managed to develop a model of resuscitation and intensive care unit work, the number of runs was determined and considered in the program for the possibility of conducting experiments and comparing the data received. An experiment was performed on a model with changing various input data. The data obtained were analyzed, including using specialized software, and some consistent patterns were identified. Practical significance: Directions for optimizing the work of the department

were proposed, and mathematical formulas were suggested for predicting and monitoring the operation of an intensive care unit.

Keywords: *simulation modeling, modeling in medicine, medical statistics, anesthesiology and intensive care, intensive care service, management in medicine, forecasting in medicine, public health and healthcare, social system, economic system*

DOI: 10.18469/ikt.2022.20.3.08

Krasnov Sergey Viktorovich, Samara State Medical University, 89, Chapaevskaya Street, Samara, 443099, Russian Federation; Head of Medical Physics, Mathematics and Informatics Department, Doctor of Technical Sciences, Professor. Tel. +7 846 374-10-04. E-mail: krasnovtlt@mail.ru

Shuk Nikolay Nikolayevich, Samara Regional Clinical Hospital, 159, Tashkentskaya Street, Samara, 443095, Russian Federation; anesthesiologist and intensive care specialist of the Intensive care unit no 2; Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, 77, Moskovskoe shosse, Samara, 443090, Russian Federation; Post-Graduate Student of Applied Informatics Department. Tel. +7 987 983-75-45. E-mail: kalabus@mail.ru

References

1. Nedashkovskiy E.V. Operational management of the anesthesiology and resuscitation service of the hospital based on a systematic approach and computerization. *Anesteziologiya i reanimatologiya*, 1988, no. 6, pp. 54–58. (In Russ.)
2. Blauberger I.V., Yudin E.G. *Formation and Essence of the System Approach*. Moscow: Nauka, 1973, 173 p. (In Russ.)
3. Baltabaev T.E. Monitor-computer system of the intensive care unit. *Realizatsiya matematicheskikh metodov s ispol'zovaniem EVM v klinicheskoy i eksperimental'noy meditsine: sb. mat. II Vsesoyuznoy konferentsii*, 1986, pp. 46–48. (In Russ.)
4. Kant V.I. *Mathematical Methods and Modeling in Healthcare*. Moscow: Meditsina, 1987, 224 p. (In Russ.)
5. Kant V.I., Kucherenko V.Z. System approach and modeling in the organization of hospital care. *Inpatient Care (Basics of Organization)* / ed. by A.G. Safonov, E.A. Loginova. Moscow: Meditsina, 1989, pp. 65–80. (In Russ.)
6. Dimov E.M., Maslov O.N. On the development of the mathematical principles of the simulation method. *Infokommunikacionnye tehnologii*, 2003, vol. 1, no. 2, pp. 5–11. (In Russ.)
7. Dimov E.M. et al. The dynamics of the development of a simulation model of a business process. *Infokommunikacionnye tehnologii*, 2013, vol. 11, no. 1, pp. 63–78. (In Russ.)
8. Goldstein R., Mulley A. Use of a computerized data base for outcome analysis of a medical intensive care unit. *Proceeding: 4th Annual Symposium Computer Application Medical Care*, 1980, vol. 1–3, pp. 1084–1086.
9. Heck E., Koliner C., Knapp R. An interactive intensive care unit information system. *Proceeding: Computer Cardiology 8th Meeting*, 1981, pp. 243–245.
10. Malakhov I.A., Matveeva E.A., Shuk N.N. Practical features of designing a medical information system for intensive care units and intensive care units. *Infokommunikacionnye tehnologii*, 2019, vol. 17, no. 1, pp. 115–122. DOI: <https://doi.org/10.18469/ikt.2019.17.1.17> (In Russ.)
11. Dimov E.M., Maslov O.N., Troshin Yu.V. Selection of Statistical Simulation Software. *Infokommunikacionnye tehnologii*, 2015, vol. 21, no. 2, pp. 132–139. (In Russ.)
12. Mukhin O.I. Modeling systems: a course of lectures. Perm State Technical University. URL: <http://stratum.ac.ru/education/textbooks/modelir.html> (accessed: 02.04.2019). (In Russ.)
13. Kirpichnikov A.P. et al. Comparison of structural and simulation modeling systems AnyLogic, Extendsim, Simulink. *Vestnik tekhnologicheskogo universiteta*, 2017, vol. 20, no. 15, pp. 118–122. (In Russ.)

14. Borshchëv A.V. Simulation modeling: State of the region for 2015, trends and forecast. Imitatsionnoe modelirovanie. *Teoriya i praktika: sb. trud. sed'moy Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii*, 2015, pp. 14–22. (In Russ.)
15. Gol'tsev G.V., Gordon Yu.N., Davydova F.B. Intensification of the use of beds. *Sovetskoe zdравookhranenie*, 1984, no. 12, pp. 28–32. (In Russ.)
16. Moiseev N.N. *Elements of the Theory of Optimal Systems*. Moscow: Nauka, 1975, 528 p. (In Russ.)
17. Dimov E.M., Maslov O.N. Algorithmization of quasioptimal control of non-reflex systems using statistical simulation. *Infokommunikacionnye tehnologii*, 2017, vol. 15, no. 3, pp. 205–217. DOI: <https://doi.org/10.18469/ikt.2017.15.3.01> (In Russ.)
18. Dimov E.M., Maslov O.N., Troshin Yu.V. Reducing the uncertainty in the choice of management decisions using the statistical simulation method. *Informatsionnye tehnologii*, 2014, no. 6, pp. 51–57. (In Russ.)
19. Anufriev D.P. et al. Comparative effectiveness of methods and means of information support for management decisions. *Infokommunikacionnye tehnologii*, 2014, vol. 12, no. 1, pp. 54–67. (In Russ.)
20. Nedashkovskiy E.V. *Operational Management of the Anesthesiology and Resuscitation Service of a Multidisciplinary Hospital*. Arkhangel'sk: SGMU, 2009, 200 p. (In Russ.)

Received 23.08.2022

УДК 004.738.5: 621.391

УНИВЕРСАЛЬНАЯ «УМНАЯ» ПРИСТАВКА К БЫТОВОЙ ТЕХНИКЕ

Росляков А.В.

Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, Самара, РФ

E-mail: arosl@mail.ru

Представлен простой и дешевый способ превращения обычных бытовых приборов (холодильники, микроволновые печи, кофеварки, стиральные машины, кулеры и др.) в «умные» с помощью автономной беспроводной приставки для реализации «умного дома» в рамках концепции Интернета вещей. Разработана базовая архитектура аппаратного обеспечения приставки, в состав которой входит микроконтроллер, модуль Wi-Fi со встроенной антенной, аккумуляторная батарея или блок питания от сети 220 В. В зависимости от выполняемых функций базовая архитектура приставки может быть дополнена различными модулями – внешними датчиками (сенсоры, детекторы, сканеры и т. п.), принимающими сигналы от бытовой техники, модулем памяти, модулями ввода или вывода информации, модулем часов и др. Программное обеспечение микроконтроллера приставки обеспечивает прием и обработку информации от различных внешних датчиков, формирование информации о работе бытового прибора и передачу ее через беспроводную точку доступа на базе технологии Wi-Fi в Интернете для оповещения пользователя через соответствующее мобильное приложение. Приставка может работать совместно с обычными бытовыми приборами без вмешательства в их конструкцию. Потенциальными потребителями приставки является прежде всего население, а также любые организации и фирмы, использующие в своих офисах и производственных помещениях различную бытовую технику. На базе предложенной архитектуры приставки разработано решение в виде «умной бутылки», которая позволяет обеспечить контроль уровня воды в 19-литровой бутылки и с помощью мобильного приложения реализовать автоматический заказ бутылей у поставщика бутилированной воды. Приставка может использоваться с любыми типами кулеров/диспенсеров для воды и даже с бутылками с ручной помпой.

Ключевые слова: Интернет вещей, «умный дом», приставка к бытовой технике, контроллер, сеть Wi-Fi, мобильное приложение, «умная бутылка»

Введение

Концепция Интернета вещей IoT (Internet of Things) [1–5] находит все более широкое практическое внедрение в виде различных решений «умного дома» [6]. Такие решения основывают-

ся на использовании единого центра управления различными подсистемами жилых помещений (освещения, отопления, охраны, контроля доступа, пожарной сигнализации, вентиляции и кондиционирования и др.). С помощью различных