

4. Зацепин С. С. Применение турбодетандерных установок на газораспределительных станциях / С. С. Зацепин, С. М. Купцов. — Текст : непосредственный // Территория Нефтегаз. — 2016. — № 12. — С. 50-53.
5. Люгай С. В. Научно-технические задачи в области использования природного газа в качестве моторного топлива / С. В. Люгай. — Текст : непосредственный // Газовая промышленность. — 2018. — № 1. — С. 14-23.
6. Honeywell. Unisim Design : [сайт]. — URL: <https://www.honeywell.ru/products/unisim/> (дата обращения: 17.02.2022). — Текст : непосредственный.

**П. Н. Подзолков**

*Тюменский государственный университет, г. Тюмень*

**УДК 004.942, 616-036.22**

## **ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭПИДЕМИИ ИНФЕКЦИОННОГО ЗАБОЛЕВАНИЯ С УЧЕТОМ КОЛИЧЕСТВА И МОЩНОСТИ МЕДИЦИНСКИХ УЧРЕЖДЕНИЙ**

***Аннотация.** В работе рассматривается проблема моделирования эпидемий инфекционных заболеваний. Представлена имитационная модель, учитывающая две формы проявления инфекционного заболевания и оказание медицинской помощи индивидам. Показана зависимость количества летальных исходов при эпидемии от вместительности медицинских учреждений, оказывающих помощь индивидам с тяжелой формой заболевания. Рассмотрен подход к оценке минимального достаточного уровня мощности системы здравоохранения во время эпидемии.*

***Ключевые слова:** имитационное моделирование, эпидемиологическое моделирование, инфекционные заболевания, мощность системы здравоохранения.*

**Введение.** Характерной чертой инфекционных заболеваний является их способность эффективно распространяться среди популяции возможных носителей. Сильные эпидемии в природных популяциях способны приводить к нарушению экологического равновесия. Вспышки инфекции среди сельскохозяйственных животных

могут иметь значительные экономические последствия. И наконец эпидемии, возникающие среди людей, являются актуальной проблемой, касающейся не только областей здравоохранения и экономики, но и многих других социальных сфер [1].

Одним из основных методов превентивной защиты от значительного распространения инфекционных заболеваний является моделирование и последующее прогнозирование динамики развития эпидемии. При наличии прогнозов развития ситуации могут быть выбраны наилучшие тактики по уменьшению последствий эпидемии. Таким образом, одной из основных задач моделирования эпидемий является демонстрация эффективности различных мер противодействия для выбора наилучшей среди них с экономической и здравоохранительной точек зрения [2].

При распространении заболевания, которое может протекать в тяжелой форме, важным становится обеспечение городов достаточным количеством медицинского оборудования необходимого для минимизации летальных исходов у пациентов с острым проявлением заболевания. Например, во время эпидемии COVID-19 встал вопрос о минимальном количестве аппаратов ИВЛ, которым необходимо обеспечить медицинские учреждения, перепрофилированные под лечение инфекции [3].

Эпидемиологическое моделирование, которое учитывает оснащенность медицинских учреждений, обслуживающих население, позволяет оценить эффект от данного уровня оснащенности на последствия эпидемии.

Для демонстрации возможности подобной оценки были поставлены следующие задачи:

1. Построить имитационную модель эпидемии инфекционного заболевания с двумя формами и оказанием медицинской помощи.
2. Сравнить итоговую смертность после эпидемии при различной медицинской поддержке населения.

#### *Описание модели*

В разработанной модели процесс протекания заболевания представлен как последовательность состояний, в которых могут находиться индивиды. Индивиды могут переходить из одного состояния

в другое с течением времени. Схема построенной модели представлена на рис. 1.

В модели используются следующие 6 состояний: S — восприимчивый, M — болеющий в легкой форме, Se — болеющий в тяжелой форме, H — болеющий с оказанием медицинской помощи, R — выздоровевший, D — умерший.

Для определения моментов переходов каждого индивида между состояниями введены следующие обозначения:

- $P_{inf}(t)$  — вероятность заболеть в момент времени  $t$ .
- $P_M$  — вероятность при заболевании индивида проявления у него легкой формы.
- $T_M, T_{Se}, T_H$  — средняя продолжительность течения легкой и тяжелой форм заболевания и средний срок оказания медицинской помощи соответственно.
- $P_{MR}, P_{SeR}, P_{HR}$  — вероятности выздоровления при соответственно легкой и тяжелой формах заболевания и медицинской помощи.
- Queue — система очередей.

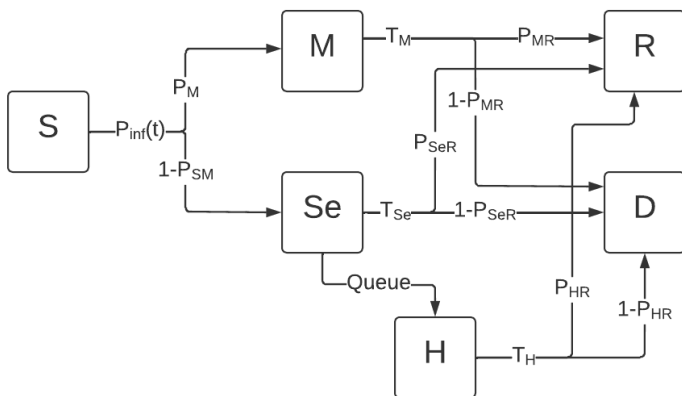


Рис. 1. Модель заболевания с двумя формами и медицинской помощью

Переход индивида в момент времени  $t$  из состояния S осуществляется как случайное событие с вероятностью  $P_{inf}(t)$ , которое вычис-

ляется из уравнения 1. Выбор состояния, в котором завершится данный переход, также является случайным событием. Вероятность завершения перехода в состоянии  $M$  равна  $P_M$  и задается при построении модели. Завершение перехода в состоянии  $Se$  происходит с вероятностью равной  $1-P_M$ .

$$P_{inf}(t) = 1 - (1 - \beta)^{N_M(t)+N_{Se}(t)+N_H(t)}, \quad (1)$$

где  $\beta$  — величина, задаваемая до начала симуляции, отражающая вероятность заражения одного конкретного восприимчивого одним конкретным инфицированным за один шаг симуляции,

$N_M(t)$ ,  $N_{Se}(t)$ ,  $N_H(t)$  — количество индивидов в момент времени  $t$  на стадиях  $M$ ,  $Se$  и  $H$  соответственно.

При построении модели задаются параметры для формирования нормальных распределений для определения продолжительности состояний  $M$ ,  $SE$  и  $H$ . Каждому индивиду при попадании в одно из данных состояний ставится в соответствие случайная величина его продолжительности  $T_M$ ,  $T_{SE}$ , или  $T_H$  из соответствующего распределения. Данная величина используется для дальнейшего отсчета времени до момента перехода из текущего состояния. Через значения вероятностей  $P_{MR}$ ,  $P_{SeR}$ ,  $P_{HR}$  определяются конечные состояния данных переходов.

Оказание медицинской помощи происходит по системе очередей Queue. Для работы данной системы при построении модели задается количество медицинских учреждений и их средняя вместительность. Каждый индивид, попавший в состояние  $Se$  попадает в очередь в одно из учреждений. Если в данном медицинском учреждении есть свободные места оказания помощи, то данный индивид занимает свободное место и переходит в состояние  $H$ . В случае отсутствия свободных мест, индивид остается в очереди и продолжает находиться в состоянии  $Se$ . Если к моменту завершения срока заболевания  $T_{Se}$  данного индивида, он будет находиться в очереди, то он покинет ее без оказания помощи. В таком случае произойдет переход в состояние  $R$  с вероятностью  $P_{SeR}$  и в состояние  $D$  с вероятностью  $P_{SeD}$ .

### *Материалы.*

В качестве параметров для модели были взяты условные значения показателей, отвечающие нескольким введенным правилам:

1.  $P_{MR} > 0,5$  — вероятность выздоровления при легкой форме должна быть больше 50%.

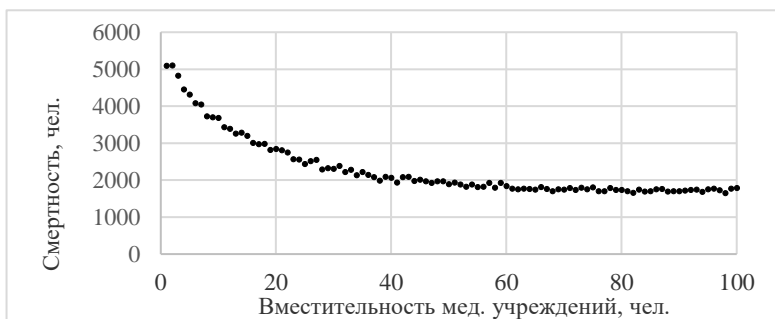
2.  $P_{MR} > P_{SeR}$  — вероятность выздоровления при легкой форме должна быть больше таковой у тяжелой формы.

3.  $P_{HR} > P_{SeR}$  — вероятность выздоровления при оказании медицинской помощи должна быть больше таковой у тяжелой формы заболевания без оказания помощи.

В остальном параметры модели описывали возникновение эпидемии тяжелого смертельного инфекционного патогена в небольшой популяции.

### *Исследование влияние вместительности медицинских учреждений на итоговую смертность*

Были проведены 100 симуляций эпидемии в популяции из 10000 человек. В каждой следующей симуляции изменялась средняя вместительность 10 медицинских учреждений, обслуживающих население. Остальные параметры модели не изменялись. В результате каждой симуляции было зафиксировано итоговое количество летальных исходов после эпидемии. Результаты всех симуляций представлены на рис. 2.



*Рис. 2.* Зависимость количества умерших в процессе эпидемии от вместительности медицинских учреждений

Как видно из зависимости, представленной на рис. 2, увеличение вместительности медицинских учреждений приводит к снижению итоговой смертности от эпидемии инфекционного патогена. Стоит также отметить, что с определенного количества мест в медицинских учреждениях итоговый уровень смертности стабилизируется. При дальнейшем увеличении вместительности значительного снижения смертности не происходит. Например, для данной эпидемии и 10 медицинских учреждений для минимизации смертности достаточно будет оснастить каждое учреждение 50 местами медицинской помощи.

Таким образом, подобный анализ может быть использован для оценки минимального достаточного уровня мощности здравоохранительной системы, которую необходимо развернуть для конкретной эпидемии.

**Заключение.** Была разработана имитационная модель, отражающая распространение инфекционного патогена и учитывающая оказание медицинской помощи больным в тяжелой форме.

При моделировании могут быть заданы параметры, отражающие эффективность распространения патогена, вероятность различных форм заболевания, присущая каждой форме смертность и продолжительность заболевания, срок оказания медицинской помощи, количество и вместительность медицинских учреждений. Подобная модель, учитывающая различные формы заболевания и факт оказания медицинской помощи, описана в работе А. В. Матвеева. Однако там предполагалось, что каждому больному, находящемуся в критической ситуации, гарантированно будет оказана помощь. Таким образом, в модели не учитывалась ограниченность медицинских ресурсов и не было системы очередей [4]. В настоящей же работе акцент был сделан именно на ограниченности здравоохранительных ресурсов в один момент времени.

Предложенный подход к моделированию может быть использован для оценки эффекта от развернутой медицинской мощности и последующего выбора оптимальной с экономической и здравоохранительной точек зрения тактики медицинской защиты населения от эпидемии.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Яковлев С. А. Инфекционные заболевания как глобальная проблема современности / С. А. Яковлев. — Текст : электронный // Территория науки. — 2017. — № 1. — С. 20-23. — URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/infektsionnye-zabolevaniya-kak-globalnaya-problema-sovremennosti> (дата обращения: 25.05.2022).
2. Кондратьев М. А. Методы прогнозирования и модели распространения заболеваний / М. А. Кондратьев — Текст : электронный // Компьютерные исследования и моделирование. — 2013. — Т. 5, № 5. — С. 863–882. — URL: [http://www.mathnet.ru/php/archive.phtml?wshow=paper&jrnid=crm&paperid=441&option\\_lang=rus](http://www.mathnet.ru/php/archive.phtml?wshow=paper&jrnid=crm&paperid=441&option_lang=rus) (дата обращения: 25.05.2022).
3. Минимальная потребность в реанимационных койках и дыхательном оборудовании в учреждениях, перепрофилированных под лечение новой коронавирусной инфекции COVID-19 / Б. В. Силаев, В. И. Вечорко, Д. Н. Проценко [и др.]. — Текст : электронный // Вестник интенсивной терапии имени А. И. Салтанова. — 2020. — № 2. — С. 34-40. — URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/minimalnaya-potrebnost-v-reanimatsionnyh-koyskah-i-dyhatelnom-oborudovanii-v-uchrezhdeniyah-pereprofilirovannyh-pod-lechenie-novoy> (дата обращения: 25.05.2022).
4. Матвеев А. В. Математическое моделирование оценки эффективности мер против распространения эпидемии COVID-19 / А. В. Матвеев. — Текст : электронный // Национальная безопасность и стратегическое планирование. — 2020. — № 1. — С. 23-39. — URL: <https://vestnik.astu.org/temp/650dbc591a4e5f9b7d47d1769e5957aa.pdf> (дата обращения: 25.05.2022).