

# Медицинская и биологическая кибернетика

УДК 614.2:004.942:519.876.5:004.651:004.652.4

М.Ю. Антомонов, Е.Б. Лопин, О.В. Рычка, Т.В. Ярош

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ ОКАЗАНИЯ МЕДИЦИНСКОЙ ПОМОЩИ И ЭТАПНОГО ЛЕЧЕНИЯ В ВООРУЖЕННЫХ СИЛАХ

В виде математических формул с их описанием приведен аналог разработанной (2003–2007 гг.) и реализованной авторами в соответствующем программном обеспечении алгоритмической математической модели оказания медицинской помощи и этапного лечения в Вооруженных Силах Украины. В приведенной математической модели описано представление медицинских систем в виде так называемых узлов медицинского обслуживания, а также описаны основные математические параметры и закономерности, которые позволяют абстрактно отобразить движение пациентов (раненых или больных) в границах данных систем.

**Введение.** Существует взгляд, что аналитические математические модели возможно создать только для сравнительно несложных систем, в противоположном случае используют так называемые алгоритмические математические модели (термины см. в [1]), которые, как правило, не могут быть представлены эквивалентными формулами, или могут быть представлены, например, в виде чрезвычайно сложных для решения систем дифференциальных уравнений [2].

Кроме этого, оформленные в соответствии с существующими государственными стандартами, алгоритмические математические модели (алгоритмы компьютерных программ) сложных систем занимают настолько много места, что их невозможно представить в понятном и удобном для восприятия виде.

Поэтому актуальной является разработка в рамках развития информационной инфраструктуры медицинской службы и создания автоматизированной системы управления медицинским обеспечением Вооруженных Сил Украины именно аналитических математических моделей, что нашло отражение в концептуальных планирующих документах, например таких, как утвержденная приказом министра обороны Украины от 24.11.2006 г. № 678 “Програма розвитку системи медичного забезпечення Збройних Сил України на 2006-2011 роки” (п. 4.10 “Удосконалення інформаційного забезпечення діяльності військово-медичної служби Збройних Сил України”).

В данное время в медицинской службе Вооруженных Сил Украины разработаны и используются модели нескольких систем медицинского обеспечения в виде отдельных компьютерных реализаций:

— стратегического и оперативного планирования лечебно-эвакуационного обеспечения войск (сил) и управления медицинской службой на уровне оказания квалифицированной медицинской помощи [3, 4];

— системы лечебно-эвакуационного обеспечения Военно-Морских Сил Украины [5, 6];

— лечебно-эвакуационного обеспечения частей и соединений армейского корпуса объединенных сил быстрого реагирования [7, 8].

Однако, несмотря на явный прогресс, на наш взгляд, существуют некоторые препятствия для широкого внедрения разработанных моделей в практику:

— модели не позволяют определять ряд важных показателей деятельности систем медицинского обеспечения (показатели загруженности коек лечебных учреждений ранеными и больными в динамике), вследствие чего результаты моделирования не могут полностью удовлетворить потребителя на оперативном и стратегическом уровне управления;

— модели не испытывались с реальными исходными данными, вместо этого использовались обобщенные и недостаточно детальные статистические данные из литературных источников; поэтому, соответственно, модели не проверялись на адекватность, точность и достоверность, а научная и практическая ценность их, вследствие этого, сомнительна;

— создателями моделей не уделялось достаточного внимания разработке необходимой технической, справочной и другой документации, например предусмотренной системой ГОСТов “Единая система программной документации”;

— компьютерная реализация моделей (программное обеспечение) требует доработки и усовершенствования.

Из этого следует, что существующее состояние дел по разработке моделей для автоматизированных систем управления не может удовлетворить возрастающих потребностей медицинской службы Вооруженных Сил Украины. Поэтому нами была разработана описанная ниже в виде аналитических формул, дополненных соответствующими схемами (графами), математическая модель системы оказания медицинской помощи и этапного лечения в Вооруженных Силах Украины (далее СМПЭЛ).

**Цель исследования.** Цель исследования заключалась в адекватном и достаточно подробном для практического применения представлении процессов и частных случаев такой сложной многоуровневой нестационарной динамической системы, как СМПЭЛ, в виде аналитической математической модели.

**Материалы и методы исследования.** Использовались системный анализ, методы сетевого моделирования, элементы теории графов, теории сложных систем и очередей, структурное программирование.

**Результаты исследования и их обсуждение.** В соответствии с основными положениям теории сложных систем нами было предложено представлять СМПЭЛ как сложную многоуровневую систему учреждений здравоохранения с их сотрудниками, которые объединены общей задачей оказания всех предусмотренных видов медицинской помощи и осуществления этапного лечения больных, раненых, пострадавших (далее пациенты). При этом пациенты тоже рассматриваются как элементы системы и на уровне приемных (приемно-сортировочных) отделений подразделяются на больных (раненых, пострадавших) хирургического или терапевтического профиля разной степени тяжести, разных классов, групп, подгрупп и нозологических форм заболеваний и повреждений. При этом распределение пациентов на группы соответствует распределению в реальной системе оказания медицинской помощи больных, раненых и пострадавших на

однородные по медицинским и эвакуационно-транспортным характеристикам группы (далее – категории пациентов).

Процесс оказания медицинской помощи и этапного лечения в предложенной системе можно представить следующим образом. Во время нахождения в границах системы каждый пациент посещает некоторую часто предопределенную последовательность мест пребывания: место постоянного пребывания (место ранения, заболевания) → транспортировка → учреждение здравоохранения или его подразделение → транспортировка → учреждение здравоохранения или его подразделение →...→ место постоянного пребывания (в случае выздоровления).

В местах пребывания, где оказывается медицинская помощь (учреждение здравоохранения или его подразделение), больной (раненый, пострадавший) в общем случае ожидает первичную медицинскую помощь и после ее оказания направляется на окончательное лечение или на дальнейшую транспортировку (эвакуацию).

Согласно основным положениям теории сложных сетей [9, 10] описанное перемещение пациентов в системе можно представить в виде графа (см. рис. 1), в котором узлами-вершинами ( $\omega_k$ ), соответствующими местам пребывания (обслуживания) пациентов, в зависимости от уровня детализации являются группы подразделений (кабинетов, отделений) учреждений здравоохранения, их подразделения или отдельные врачи (врачебно-сестринские бригады), а ребрами – потоки перемещающихся от одного узла к другому пациентов. Топография перемещений каждого пациента будет зависеть от особенностей ранения (заболевания или поражения), организационных факторов и т. п.

В общем виде СМПЭЛ можно описать следующей формулой, соответствующей графическому представлению на рис. 1:

$$\text{СМПЭЛ} = \left\{ \omega_k, \bar{\omega}_{k-n}, \bar{\omega}_{n-k}, \bar{\omega}_{k,In}, \bar{\omega}_{k,Out}, \bar{\omega}_{k,Inner}, n \neq k; \right. \\ \left. k = 1, \dots, N_{dep}; n = 1, \dots, N_{dep} \right\}, \quad (1)$$

где  $\omega_k$  — узлы медицинского обслуживания;  $\bar{\omega}_{k-n}$ ,  $\bar{\omega}_{n-k}$  — потоки пациентов в разрешенном направлении от  $k$ -го к  $n$ -му узлу и наоборот;  $\bar{\omega}_{k,In}$  — входящий поток пациентов в  $k$ -й узел (поступающие в систему пациенты);  $\bar{\omega}_{k,Out}$  — выходящий поток пациентов из  $k$ -го узла (выбытие пациентов из системы вследствие выписки или других возможных результатов лечения);  $\bar{\omega}_{k,Inner}$  — внутренний поток в  $k$ -м узле (пациенты, перемещающиеся из места лечения в очередь на транспортировку в другие узлы);  $N_{dep}$  — количество узлов.

Как видим, индексы  $In$ ,  $Inner$  и  $Out$  обозначают качественную разновидность потока пациентов, индексы  $kat$  и  $dep$  — качественную принадлежность к категориям либо узлам, другие индексы являются числовыми. Поэтому в дальнейшем в формулах так же, как и в формуле (1), индексы будут разделяться запятой.

Каждый узел  $\omega_k$  схематически можно представить так, как изображено на рис. 2.

Согласно рис. 2 под таким абстрактным объектом, как узел медицинского обслуживания, понимается комплекс числовых

(действительных) показателей, среди которых к наиболее важным относятся три следующих:  $\xi_k$  — количество пациентов в очереди на медицинское обслуживание, поступающих из потоков  $\bar{\omega}_{k,In}$  и  $\bar{\omega}_{n-k}$ ;  $\eta_k$  — количество пациентов, которые поступают из очереди  $\xi_k$  и остаются в узле для окончательного или временного лечения, а также служат источником для формирования потоков  $\bar{\omega}_{k,Out}$  и  $\bar{\omega}_{k,Inner}$ ;  $\vartheta_k$  — количество пациентов в очереди на транспортировку из узла, формируется за счет пациентов, поступающих из места лечения и из очереди  $\xi_k$ , является источником для формирования потоков  $\bar{\omega}_{k-n}$ .

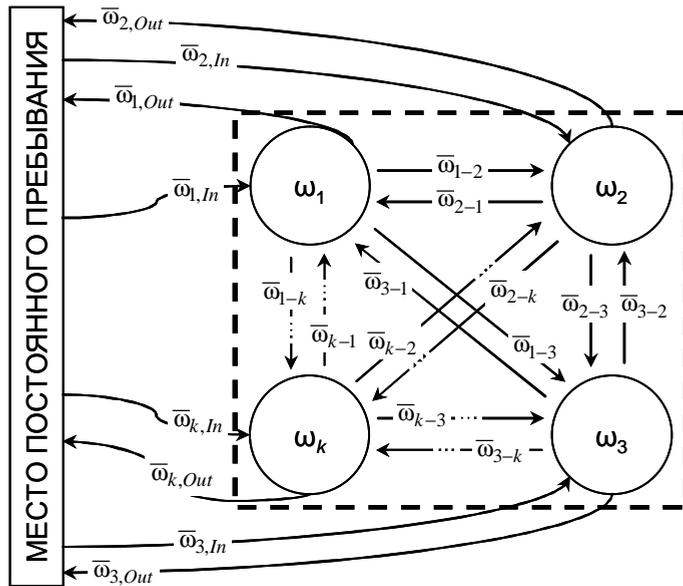


Рис. 1. Принципиальная функциональная схема построения сетевой модели (графа) системы медицинского обслуживания

Потоки пациентов  $\xi_k - \vartheta_k$ ,  $\xi_k - \eta_k$  и  $\eta_k - \vartheta_k$  ( $\bar{\omega}_{k,Inner}$ ) являются внутриузловыми, т.е. переход соответствующих количеств пациентов между очередями  $\xi_k$ ,  $\vartheta_k$  и  $\eta_k$  возможен только в границах одного узла, в то же время потоки  $\bar{\omega}_{k-n}$  и  $\bar{\omega}_{n-k}$  обычно направляются между отдельными узлами системы.

Внешние потоки  $\bar{\omega}_{k,In}$  в узлы являются внешними для СМПЭЛ и формируют общий поток поступления пациентов в систему  $\bar{\omega}_{In} = \{\bar{\omega}_{k,In}; k = 1, \dots, N_{dep}\}$ . Элементарный поток поступления пациентов некоторой категории в СМПЭЛ, согласно принятым в военной медицине подходам, определяется численностью личного состава группировки войск или величиной контингента населения, медицинское обеспечение которых моделируется (далее контингенты обслуживания), и коэффициентами заболеваемости или коэффициентами потерь (последние используются для вооруженных сил на военное время и являются относительной частью постоянно или временно вышедшего личного состава войск от его текущей численности за сутки или другой промежуток времени).

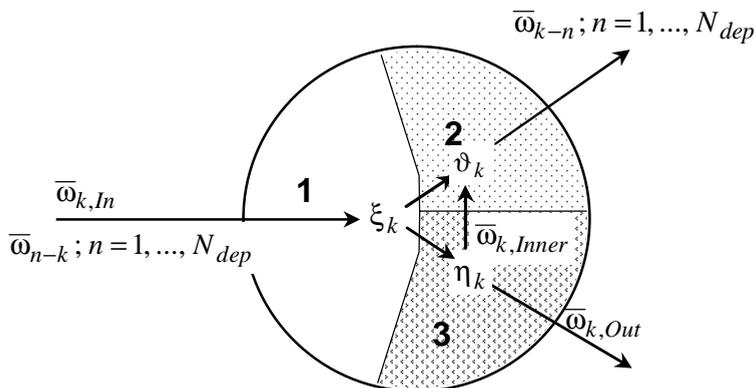


Рис. 2. Принципиальная схема узла медицинского обслуживания:  
 1 ( $\xi_k$ ) – очередь на медицинское обслуживание; 2 ( $\vartheta_k$ ) – очередь на транспортировку из узла; 3 ( $\eta_k$ ) – госпитализированные пациенты.

Следует отметить, что для разработки математической модели и конкретных ее аналитических и алгоритмических реализаций целесообразно применить подход, заключающийся в том, что в качестве категорий рассматриваются однородные по медицинским и эвакуационным характеристикам группы пациентов, дополнительно дифференцированные по контингентам обслуживания (местам постоянного пребывания), из которых они поступают. Например, если условно выделить во время боевых действий такие приблизительно подобные по своим лечебно-эвакуационным характеристикам группы раненых, как “раненые с огнестрельными переломами длинных трубчатых костей из 1-ой механизированной бригады” и “раненые с огнестрельными переломами длинных трубчатых костей из 2-ой механизированной бригады”, они в модели все равно должны считаться разными категориями пациентов.

В ходе выполнения данного исследования нами было установлено, что целесообразно предусмотреть движение времени с двумя синхронизированными фиксированными временными шагами (“способ  $\Delta t$ ”) [1], связанными между собой.

Для примера, обозначим дискретное время моделирования как  $\tau$ ,  $1 \leq \tau \leq \text{MaxDay}$ ,  $\Delta\tau = 1$  (см. рис. 3),  $\text{MaxDay}$  — длительность времени, на которое осуществляется моделирование, например в сутках. Каждый промежуток времени  $\tau$ , в свою очередь, может быть разделен на  $\text{Step}$  дискретных частей и, таким образом, превращается во время  $\tau'$ ,  $1 \leq \tau' \leq \text{MaxDay} \cdot \text{Step}$ ,  $\Delta\tau' = 1$ , где  $\text{Step}$  — названный нами переходный шаг моделирования, который является целым положительным числом и фактически означает долю промежутка времени  $\tau$  (точнее долю определяет величина  $\frac{1}{\text{Step}}$ ). Таким образом, если время  $\tau$  измеряется в сутках, то время

$\tau'$  может измеряться, например, в часах или других долях суток. В результате описанный подход позволяет для каждого момента (промежутка) времени моделирования рассчитывать показатели с учетом значений на все предыдущие моменты времени.

Далее нами будет в основном использоваться термин “момент времени”. Каждый момент времени будет нумероваться отдельным индексом согласно

принципу, представленному на рис. 3 ( $\tau_d, \tau'_i$ ), при этом считается, что он исчерпывающе отображает процессы, протекающие на протяжении соответствующего промежутка времени.

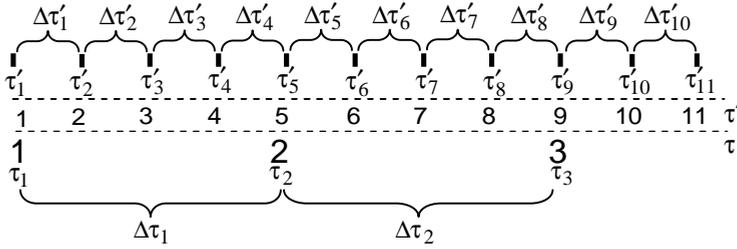


Рис. 3. Способ представления времени в модели, когда  $Step = 4$

В соответствии с вышеизложенным подходом к представлению времени в модели интенсивность входящего потока  $\bar{\omega}_{k,In} = \{\bar{\omega}_{k,In,j}; j = 1, \dots, N_{kat}\}$  ( $\bar{\omega}_{k,In,j} = \mathbf{U}_{d \in [1, \dots, MaxDay]} (A_{j,d})$ ) в СМПЭЛ в  $d$ -й момент времени  $A_j$  может быть представлена следующим образом:

$$A_{j,d} = \sum_{g=1}^{N_{kat}} N_{g,0,d} \cdot K_{j,d}, \quad (2)$$

где  $d$  — номер момента времени  $\tau$  ( $d = 1, 2, 3, \dots, MaxDay$ );  $MaxDay$  — количество дискретных моментов времени моделирования  $\tau$ ;  $N_{g,0,d}$  — начальная численность  $g$ -го контингента обслуживания в  $d$ -й момент времени  $\tau$ ;  $K_{j,d}$  — коэффициенты заболеваемости или потерь, необходимые для образования  $j$ -й категории пациентов в  $d$ -й момент времени  $\tau$  (индекс  $g$  не применяется вследствие принятого определения категории, однако возможно и обозначение  $K_{g,j,d}$ ),  $\sum_{j=1}^{N_{kat}} K_{j,d} \leq 1$ .

Согласно нашему опыту при моделировании обычно используются сравнительно небольшие коэффициенты потерь или заболеваемости (не более 0,1), поэтому в таких условиях правилами сложения вероятностей для упрощения расчетов можно пренебречь, что позволяет значительно упростить формулу (2) и представить ее в приведенном выше виде.

Поток пациентов  $\bar{\omega}_{k,In}$  в  $k$ -й узел будет состоять из элементарных потоков отдельных категорий, детерминированно направленных в данный узел, являющийся первым по порядку в общем списке узлов для данной категории пациентов.

Выходящий поток пациентов из системы  $\bar{\omega}_{Out}$ , как и входящий, состоит из отдельных потоков  $\bar{w}_{k,Out}$  из узлов:  $\bar{\omega}_{Out} = \{\bar{w}_{k,Out}; k = 1, \dots, N_{dep}\}$ , или

$$\bar{\omega}_{Out} = \sum_{k=1}^{N_{dep}} \bar{w}_{k,Out}, \quad (3)$$

$$\bar{w}_{k,Out} = \mathbf{U}_{d \in [1, \dots, MaxDay]} (U_{k,d}). \quad (4)$$

Интенсивность выходящего потока пациентов (потока выписки)  $U_k$  из  $k$ -го узла, т.е. количество пациентов, выписанных (выбывших) в  $d$ -й момент времени, может быть представлена следующим образом:

$$U_{k,d} = \sum_{j=1}^{N_{kat}^k} U_{k,j,d} = \sum_{j=1}^{N_{kat}^k} \sum_{q=1}^d U_{k,j,q,d}, \quad (5)$$

$$U_{k,j,q,d} = \sum_{f=1}^{N_{FlowOut}} (A_{k,j,q} \cdot P_{k,j,f,n}), \quad (6)$$

где  $d$  — аналогично формуле (2);  $N_{kat}^k$  — количество категорий пациентов, направляемых в  $k$ -й узел;  $A_{k,j,q}$  — количество пациентов  $j$ -й категории, поступивших на лечение в  $k$ -й узел в  $q$ -й момент времени  $\tau$  ( $\tau_q$ );  $P_{k,j,f,n}$  — вероятность выбытия (выписки или наступления другого результата лечения) для пациентов  $j$ -й категории в  $k$ -м узле в состоянии  $f$  в  $d$ -й момент времени  $\tau$ ;

$$n = d - (q - 1), \quad 0 < q \leq d. \quad (7)$$

Важным является выполнение условия:

$$\sum_{v=1}^{TimeTreat_{kj}} \sum_{f=1}^{N_{FlowOut}} P_{k,j,f,v} = 1, \quad (8)$$

где  $TimeTreat_{kj}$  — максимальное время нахождения (пребывания, лечения) пациентов  $j$ -й категории в  $k$ -м узле — целое число, равняющееся количеству моментов времени  $\tau$ ;  $N_{FlowOut}$  — количество видов выписки (возможных результатов лечения).

Практические исследования показали, что выписка больных из военных госпиталей в мирное время зависит от дня недели поступления, поэтому согласно предыдущим исследованиям оказалось целесообразным предусмотреть в модели использование вероятностей выписки, дифференцированных по дням недели поступления (так называемая дифференцированная нестационарная модель выписки, термины см. в статье [11]). В этом случае в формуле (8) вместо  $P_{k,j,f,n}$  подставляются  $P_{k,j,f,b,n}$ , где индекс  $b$  обозначает вид модели выписки,  $b=0$  для общей нестационарной модели,  $b=1..7$  в дифференцированной нестационарной модели (в программировании так кодируют дни недели, 1 соответствует воскресенью, 2 — понедельнику и так далее), он вычисляется в соответствии с датой реального времени поступления пациентов в  $k$ -й узел (например, специальной функцией Delphi DayOfWeek [12]).

Входящий и выходящий потоки для СМПЭЛ целесообразно задавать по времени  $\tau$ , другие расчеты в модели целесообразно проводить более детально, что возможно только с использованием более мелкого шага.

Соответственно, если используется час  $\tau'$ , то формула (5) может быть представлена:

$$U_{k,i} = \sum_{j=1}^{N_{kat}^k} U_{k,j,i} = \sum_{j=1}^{N_{kat}^k} \sum_{q=1}^i U_{k,j,q,i}, \quad (9)$$

$$U_{k,j,q,i} = \sum_{j=1}^{N_{kat}^k} \sum_{q=1}^i \sum_{f=1}^{N_{FlowOut}} (A_{k,j,q} \cdot \frac{P_{k,j,f,n}}{Step}), \quad (10)$$

где  $i$  — номер момента времени  $\tau'$  ( $i = 1, 2, 3, \dots, MaxDay \cdot Step$ );  $A_{k,j,q}$  — количество пациентов  $j$ -й категории, поступивших на лечение в  $k$ -й узел в  $q$ -й момент времени  $\tau'$ ;  $\frac{P_{k,j,f,n}}{Step}$  — вероятность выписки (наступления результата лечения) пациентов  $j$ -й категории в  $k$ -м узле в состоянии  $f$  в  $i$ -й момент времени  $\tau'$  (в упрощенном варианте допускается, что выписка на протяжении промежутка времени  $\tau$  распределена равномерно);

$$v = \left[ \frac{i - q}{Step} \right] + 1, \quad 0 < q \leq i, \quad (11)$$

где  $[a]$  — целая часть от числа  $a$ .

В случае использования времени  $\tau'$  образующая вследствие поступления в  $k$ -й узел пациентов из потоков  $\bar{w}_{k,In}$  и  $\bar{w}_{n-k}$  ( $n = 1, \dots, N_{dep}; n \neq k$ ) очередь  $\xi_k$  может быть представлена следующим образом:

$$\xi_{k,i} = \sum_{j=1}^{N_{kat}^k} \xi_{k,j,i}, \quad (12)$$

$$\xi_{k,j,i} = \begin{cases} \xi_{k,j,i-1} + N_{k,j,i} - \frac{RM_{k,j-1,i}}{L_{k,j}}, & \xi_{k,j,i-1} + N_{k,j,i} > \frac{RM_{k,j-1,i}}{L_{k,j}} \\ 0, & \xi_{k,j,i-1} + N_{k,j,i} \leq \frac{RM_{k,j-1,i}}{L_{k,j}} \end{cases}, \quad (13)$$

где  $X_{k,j,i-1}$  — количество пациентов  $j$ -й категории в  $k$ -м узле, оставшихся в очереди на медицинское обслуживание с предыдущего момента времени  $\tau'$  ( $\tau'_{i-1}$ );  $N_{k,j,i}$  — количество пациентов  $j$ -й категории, поступивших в  $k$ -й узел в  $i$ -й момент времени  $\tau'$ , определяется транспортным ресурсом узла и количеством пациентов, ожидающих транспортировку на предыдущем для данной категории узле (см. формулу (18));  $RM_{k,j-1,i}$  — имеющийся в наличии рассчитываемый с учетом трудоемкости обслуживания и количества обслуженных пациентов каждой категории ресурс рабочего времени для медицинского обслуживания  $k$ -го узла,  $RM_{k,0,i} = \frac{RM_k}{Step}$ ;  $L_{k,j}$  — средняя трудоемкость обслуживания пациентов  $j$ -й категории в  $k$ -м узле (в человекочасах).

Как видим, согласно формуле (13) имитация медицинского обслуживания и транспортировки пациентов осуществляется путем последовательных расчетов для каждой категории, при этом очередность обслуживания в модели заранее детерминирована отдельным показателем, назовем его  $O_{k,j}$ .

После медицинского обслуживания в  $k$ -м узле часть  $1 - S_{k,j}$  ( $S_{k,j}$  — отдельный параметр модели) пациентов  $N''_{k,j,i}$  помещается в очередь  $\vartheta_k$  (см. рис. 2) на транспортировку из узла, а часть  $S_{k,j}$  ( $N'_{k,j,i}$ ) направляется на лечение в границах данного узла. Поэтому количество госпитализированных (находящихся на лечении) пациентов может быть представлено в виде следующей формулы:

$$\eta_{k,i} = \sum_{j=1}^{N_{kat}^k} \eta_{k,j,i}, \quad (14)$$

$$\eta_{k,j,i} = \begin{cases} N'_{k,j,i} + \eta_{k,j,i-1} - U_{k,j,i}, & N'_{k,j,i} + \eta_{k,j,i-1} > U_{k,j,i}, \\ 0, & N'_{k,j,i} + \eta_{k,j,i-1} \leq U_{k,j,i} \end{cases}, \quad (15)$$

где  $N'_{k,j,i}$  — количество пациентов  $j$ -й категории, госпитализированных в  $k$ -м узле в  $i$ -й момент времени  $\tau'$ ;  $\eta_{k,j,i-1}$  — количество госпитализированных в  $k$ -м узле пациентов  $j$ -й категории, оставшихся с предыдущего момента времени  $\tau'$  ( $\tau'_{i-1}$ );  $U_{k,j,i}$  — количество пациентов  $j$ -й категории, выписанных (выбывших) из  $k$ -го узла в  $i$ -й момент времени  $\tau'$ , см. формулу (9).

При соблюдении условия, согласно которому сумма всех вероятностей выписки (или наступления других результатов лечения) пациентов  $j$ -й категории в  $k$ -м узле не должна превышать 1, второе (нижнее) уравнение формулы (15) практически может не использоваться.

Очередь пациентов на транспортировку является результатом динамического взаимодействия потока транспортировки пациентов из узла и потоков поступления пациентов из очереди на медицинское обслуживание и из места госпитализации:

$$\vartheta_{k,i} = \sum_{j=1}^{N_{kat}^k} \vartheta_{k,j,i}, \quad (16)$$

$$\vartheta_{k,j,i} = \begin{cases} N''_{k,j,i} + \vartheta_{k,j,i-1} - N_{k,j,i}^{Tr}, & N''_{k,j,i} + \vartheta_{k,j,i-1} > N_{k,j,i}^{Tr}, \\ 0, & N''_{k,j,i} + \vartheta_{k,j,i-1} \leq N_{k,j,i}^{Tr} \end{cases}, \quad (17)$$

где  $N''_{k,j,i}$  — количество пациентов  $j$ -й категории, поступивших в очередь на транспортировку в  $k$ -м узле из очереди на медицинское обслуживание и из места госпитализации;  $\vartheta_{k,j,i-1}$  — количество пациентов  $j$ -й категории, оставшихся в очереди на транспортировку из  $k$ -го узла с предыдущего момента времени  $\tau'$  ( $\tau'_{i-1}$ );  $N_{k,j,i}^{Tr}$  — количество пациентов  $j$ -й категории, транспортированных из  $k$ -го узла на следующий для данной категории узел

( $N_{k,j,i}^{Tr} = N_{k,j,i}$  в формуле (13)), которое может быть определено по формуле (18).

$$N_{k,j,i}^{Tr} = \begin{cases} \frac{RT_{k,j-1,i}}{H_{k,j}}, & N_{k,j,i}'' + \vartheta_{k,j,i-1} > \frac{RT_{k,j-1,i}}{H_{k,j}} \\ N_{k,j,i}'' + \vartheta_{k,j,i-1}, & N_{k,j,i}'' + \vartheta_{k,j,i-1} \leq \frac{RT_{k,j-1,i}}{H_{k,j}} \end{cases}, \quad (18)$$

где  $N_{k,j,i}''$ ,  $\vartheta_{k,j,i-1}$  – см. пояснения к формулам (16) и (17);  $RT_{k,j-1,i}$  — имеющийся в наличии рассчитываемый с учетом сложности транспортировки и количества транспортированных пациентов каждой категории ресурс  $k$ -го узла по транспортировке пациентов “на себя”,

$RT_{k,0,i} = \frac{RT_k}{Step}$ ;  $H_{k,j}$  — средняя сложность транспортировки пациентов  $j$ -й

категории в  $k$ -й узел, определяется количеством эвакуомест (сидячих мест), необходимых для транспортировки каждого пациента данной категории.

Отражены в вышеприведенных формулах принципы были реализованы нами на практике во время разработки двух компьютерных программ — Model и Hospital. Заполнение базы данных этих программ вероятностными показателями, определенными на основе реальных данных учета пациентов в двух военных госпиталях (на протяжении девяти лет по состоянию на 09.12.2009 г. в электронных базах данных было учтено 327908 человек [13]), позволило доказать относительно высокую точность и адекватность разработанной математической модели [11].

Учитывая, что публикации относительно оценки точности, адекватности и достоверности моделей движения пациентов внутри отдельных лечебных учреждений и их систем практически отсутствуют, разработанная нами и реализованная с помощью вышеназванных компьютерных программ математическая модель в данное время является единственным в Украине инструментом, практически пригодным для автоматизации трудоемкого процесса планирования стационарной медицинской помощи населению в мирное время, а также планирования лечебно-эвакуационного обеспечения войск в военное время.

Программа Model и, соответственно, математическая модель, является единственным научно обоснованным средством автоматизации планирования медицинского обеспечения, которое реально используется во время проведения командно-штабных учений и тренировок органов управления Вооруженных Сил Украины в рамках осуществления мероприятия боевой подготовки для обоснования потребности в ресурсах медицинской службы, необходимых для оказания медицинской помощи и лечения раненых, больных и пострадавших на этапах медицинской эвакуации на случай возникновения военных конфликтов или чрезвычайных ситуаций.

**Выводы.** Разработанная в ходе выполнения данного исследования детерминированная нестационарная сетевая математическая модель системы оказания медицинской помощи и этапного лечения в вооруженных силах (разновидность с фиксированным временным шагом и детерминированной длительностью “работ”) позволяет рассчитывать показатели, отображающие процессы движения (поступление, пребывание в очередях, выписку, выбытие с другим результатом лечения) и транспортировки (эвакуации) пациентов в

границах системы (сети) лечебных учреждений с учетом реальных особенностей этих процессов и влияющих на них факторов. В результате разработанная модель при ее наполнении правильно подобранными эмпирическими исходными данными позволяет адекватно и достаточно точно отобразить и воссоздать вышеназванные процессы в виде показателей загрузки коечного фонда лечебных учреждений пациентами, что нашло отображение в ряде ее практических реализаций.

1. *Иваненко А.В., Сыпченко Р.П.* Основы моделирования сложных систем на ЭВМ. — Л.: ЛВВИУС, 1988. — 272 с.
2. Математический энциклопедический словарь / Гл. ред. Ю.В. Прохоров. — М.: Советская энциклопедия, 1988. — 847 с.
3. *Левченко Ф.М.* Імітаційне моделювання організації роботи на етапі медичної евакуації // Сучасні аспекти військової медицини: Зб. наук.-практ. роб. — Гадяч, 1997. — Вип. 2. — С. 29–30.
4. *Левченко Ф.М.* Управління кваліфікованою медичною допомогою в системі лікувально-евакуаційного забезпечення військ: дис.... канд. наук з держ. управ. — К., 1998. — С. 35–41.
5. *Левченко Ф.М., Охонько О.В.* Імітаційна модель організації лікувально-евакуаційного забезпечення Військово-Морських Сил Збройних Сил України: Методичні рекомендації. — К.: УВМА, 2003. — 25 с.
6. *Охонько О.В., Левченко Ф.М.* Імітаційне моделювання як метод дослідження лікувально-евакуаційного забезпечення Військово-Морських Сил // Проблеми військової охорони здоров'я: Зб. наук. пр. УВМА / За ред. проф. В.Я. Білого. — К., 2002. — Вип. 9. — С. 22–27.
7. *Бадюк М.І., Рудинський О.В.* Особливості організації лікувально-евакуаційного забезпечення Об'єднаних сил швидкого реагування Збройних Сил України // Військова медицина України. — 2004. — 4, № 1–2. — С. 15–19.
8. *Бадюк М.І., Охонько О.В., Рудинський О.В.* Імітаційне моделювання лікувально-евакуаційного забезпечення Об'єднаних сил швидкого реагування Збройних Сил України // Військова медицина України. — 2004. — 4, № 4. — С. 16–23.
9. *Евин И.А.* Введение в теорию сложных сетей // Компьютерные исследования и моделирование. — 2010. — 2, № 2. — С. 121–141.
10. *Еремеева Л.Э.* Поток в сетях : учебное пособие. — Сыктывкар: СЛИ, 2012. — 100 с.
11. *Ярош Т.В., Лопін Є.Б., Ричка О.В.* Аналіз імовірнісних підходів до моделювання процесу виписки пацієнтів із лікувальних закладів охорони здоров'я Міністерства оборони України // Військова медицина України. — 2006. — № 1–2. — С. 13–21.
12. *Архангельський А.Я.* Delphi-6: справочное пособие. — М.: ЗАО "Издательство БИНОМ", 2001. — 1024 с.
13. *Лопін Є.Б.* Аналіз завантаженості лікувальних закладів охорони здоров'я Збройних Сил України пацієнтами на прикладі двох військових госпіталів // Вісник соціальної гігієни та організації охорони здоров'я України. — 2009. — № 4. — С. 56–64.

ГУ «Институт гигиены и медицинской  
экологии им. А.Н. Марзеева  
НАМН Украины», Киев

Научно-исследовательский институт  
проблем военной медицины Вооруженных  
Сил Украины, Ирпень

Украинская военно-медицинская академия, Киев

Получено 26.07.2012