

**ПРАВИТЕЛЬСТВО МОСКВЫ
КОМИТЕТ ЗДРАВООХРАНЕНИЯ**

“Согласовано”
Председатель УМС
Комитета здравоохранения

Л.Г.Костомарова
15 сентября 2000 г.

“Утверждаю”
Председатель
Комитета здравоохранения

А.П.Сельцовский
15 сентября 2000 г.

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЛИКВИДАЦИИ
МЕДИЦИНСКИХ ПОСЛЕДСТВИЙ ЧС НА ПОТЕНЦИАЛЬНО
ОПАСНЫХ ПРОМЫШЛЕННЫХ ОБЪЕКТАХ МОСКВЫ**

***Методические рекомендации
(№44)***

Москва 2000

Учреждение-разработчик: Научно-практический центр
экстренной медицинской помощи
Комитета здравоохранения г.Москвы

Составители: д.м.н. Л.Г.Костомарова, Ю.С.Мелешков,
к.м.н. Т.Н.Бук, к.м.н. В.И.Потапов,
к.м.н. Д.К.Некрасов

Рецензент: зав.кафедрой скорой медицинской помощи МГМСУ
профессор Л.Л.Стажадзе, зам.директора НПЦ ЭМП
по информатизации Т.Н.Щаренская

Предназначение: территориальным центрам медицины катастроф,
начальникам управлений здравоохранения
административных округов, руководителям
лечебно-профилактических учреждений СЭМП,
министерствам и ведомствам, участвующим в
ликвидации ЧС на транспорте

Данный документ является собственностью
Комитета здравоохранения Правительства Москвы
и не подлежит тиражированию и распространению
без соответствующего разрешения

За последние годы вероятность возникновения крупномасштабных аварий и катастроф техногенного характера увеличилась.

К городам, характеризующимся высокой степенью потенциальной опасности, относится Москва — крупнейший мегаполис. На территории города имеется множество производственно-технических и исследовательских комплексов, содержащих запасы горючесмазочных, взрывчатых, ядовитых химических, радиоактивных, биоактивных веществ, со сложнейшими, потенциально опасными технологиями. Это определяет высокую вероятность возникновения на его территории чрезвычайных ситуаций, в том числе с тяжелыми последствиями. Достижение приемлемого уровня риска признано правительством города приоритетной задачей.

С целью разработки и реализации первоочередных мер по повышению безопасности населения города выполняется комплексная программа «Безопасность Москвы». В рамках выполнения программы «Безопасность Москвы» для отработки оптимальных планов медико-эвакуационного обеспечения и совершенствования организации и повышения эффективности службы экстренной медицинской помощи (СЭМП) г.Москвы при угрозе или возникновении чрезвычайных ситуаций (ЧС) выбраны крупные потенциально опасные объекты экономики Юго-Восточного административного округа г.Москвы.

Дефицит времени и непредвиденность ситуации — основные сложности управления службой экстренной медицинской помощи, для которой выбор рациональных управлеченческих решений в ЧС осложняется еще и формальной независимостью ее звеньев и необходимостью взаимодействия с другими службами.

Частично эти проблемы снимаются соблюдением регламента взаимодействия и координации служб и их звеньев в условиях ЧС. Разработка этих регламентов, приспособление их к конкретным условиям и сравнительная оценка альтернативных вариантов возможны только на уровне моделей.

Для городской СЭМП актуально исследование взаимовлияния решений, принятых для ее догоспитального и госпитального этапов, а также последствия решений, принимаемых в условиях ЧС, для всего городского здравоохранения.

Указанные задачи могут решаться с помощью компьютерных моделей. Для работы территориальной службы медицины катастроф Москвы созданы две модели: вероятностная и детерминированная.

Первая модель позволяет оценить возможности ликвидации медицинских последствий ЧС за заданное время, с учетом реальных

для Москвы условий: расположение подстанций СМП и больниц, их мощности, транспортной доступности и ряда других параметров.

Вторая модель рассматривает процесс ликвидации медицинских последствий с учетом количества и структуры пострадавших и локализации очага.

Вероятностная модель

Математическая модель имитирует процесс поступления пострадавших и работу бригад СМП и приемных отделений стационаров, определяя и фиксируя длительность каждого этапа обслуживания для всех пострадавших.

Длительности некоторых этапов определяются случайным образом (например, время обслуживания на месте), поэтому модель является стохастической, длительности других зависят от состояния системы в данный момент (например, время ожидания транспортировки), а состояние системы в данный момент зависит от времени и определяется правилами взаимодействия ее элементов, поэтому модель является динамической.

Состояние системы в определенный момент времени t описывается следующими переменными:

- очередью пострадавших на пункте сбора;
- очередью пострадавших, ожидающих транспортировки после оказания первой помощи и сортировки (с учетом тяжести состояния каждого);
- состоянием бригад СМП — на каком этапе (сортировка, первая помощь, очередь в приемном отделении и т.п.) находится каждая из них и какой пострадавший обслуживается в данный момент этой бригадой;
- состоянием бригад приемного отделения (свободна или занята) и какого пострадавшего обслуживает, если занята;
- очередями бригад СМП в приемных отделениях стационаров;
- временами изменения состояния бригад СМП и приемных отделений (т.е. временами ожидаемого перехода к следующему этапу).

Модель описывает правила изменения состояния системы при переходе от момента t к моменту $t + 1$. В момент времени $t = 0$ (момент оповещения о ЧС) задается некоторое начальное состояние системы (описание ситуации, формулировка имитационного эксперимента), а затем время последовательно увеличивается на единицу с пересчетом состояния системы по определенным правилам.

Когда система достигает такого состояния, в котором нет необслуженных пострадавших, процесс имитации заканчивается.

Формально рассматриваемая модель состоит из трех взаимодействующих систем массового обслуживания:

- 1) первая помощь и сортировка на месте сбора пострадавших;
- 2) транспортировка в стационары;
- 3) прием пострадавших в стационары и перевод в специализированные отделения.

Первая система массового обслуживания (СМО) представляет собой многолинейную (с переменным числом приборов) систему с пуассоновским входящим потоком требований нескольких типов (тяжести состояния), эрланговским распределением времени обслуживания, зависящем от типа требования, и очередью типа FIFO. Приборы первой системы (бригады СМП) могут переходить во вторую систему и наоборот (что зависит от состояний обеих систем), а выходной поток первой системы частично направляется на вход второй системы (другая часть выходного потока покидает систему — пострадавшие не требующие госпитализации). Система отличается от классической еще рядом черт: пакетное поступление требований в первый момент, ограниченный период времени поступления требований и отсроченное начало процесса обслуживания (бригады прибывают на место не сразу).

Вторая система представляет собой многолинейную систему с ожиданием и приоритетами, не прерывающими обслуживание, на вход которой поступает часть выходного потока системы 1. Данная система имеет переменное число обслуживающих устройств.

Третья система является набором из нескольких однотипных систем, каждая из которых представляет собой многолинейную систему с ожиданием, без приоритетов, с эрланговским распределением времени обслуживания, зависящим от типа требований. Выходной поток этой системы — часть выходного потока системы 2 (те пострадавшие, которые доставлены в конкретный стационар). Отличительная особенность этой системы — пакетное поступление требований, когда одна бригада СМП доставляет более одного пострадавшего.

В настоящей работе принят имитационный подход с реализацией модели в виде компьютерной программы, в которой каждая из рассмотренных СМО представлялась в виде одной или нескольких программ, а взаимодействие подсистем (подпрограмм) обеспечивалось специальным управляющим блоком.

Модель разработана на языке Visual Basic в операционной системе Windows.

В процессе работы программы формируется файл (набор карты вызова СМК в ЧС), содержащий все сведения о последовательности

действий персонала по оказанию медицинской помощи пострадавшим. Этот файл, после окончания работы, передается в интегрированный пакет электронных таблиц и графики Microsoft Excel. Поскольку обе программы работают в многозадачной среде Windows, процесс обработки результатов можно вести во время эксперимента интерактивно.

Детерминированная модель

Считается заданным время, отведенное на ликвидацию последствий ЧС (от получения сигнала до доставки последнего пострадавшего в специализированное отделение стационара).

Требуется найти план привлечения ресурсов СЭМП, обеспечивающий обслуживание всех пострадавших за заданное время минимальными силами.

Варьируемыми параметрами в системе являются:

- выбор подстанций СМП и числа привлекаемых с каждой из них бригад;
- выбор стационаров для госпитализации пострадавших и числа бригад приемного отделения в каждом из них;
- распределение сил и средств СЭМП на этапах процесса (сортировка, первая помощь в пунктах сбора, транспортировка).

В качестве дополнительных ограничений в задаче оптимизации учитываются реальные возможности службы, а именно:

- территориальное распределение подстанций и табельное число бригад на них (мощность подстанции) в рассматриваемое время;
- территориальное расположение стационаров СЭМП (базовых, резервных и вспомогательных) и их коечный фонд.

Альтернативной постановкой оптимизационной задачи является поиск плана привлечения ресурсов, минимизирующий полные затраты времени на ликвидацию медицинских последствий ЧС при ограничении суммарного объема привлекаемых сил.

В каждой из альтернативных постановок задача решается на основе детерминированной модели работы службы, т.е. при заданных и фиксированных нормативных затратах времени на обслуживание каждого пострадавшего. Эти времена, впрочем, зависят от тяжести состояния, а для этапов, связанных с движением транспорта — с расстоянием (плечо эвакуации).

Таким образом, методика решения основывается на детерминированной модели процесса ликвидации медицинских последствий ЧС с параметрами, определяемыми средними (статистическими) характеристиками процесса медицинского обслуживания (среднее

время сортировки, оказания первой помощи, приема в стационар).

Динамика процесса была бы тривиальной, если бы на всех этапах процесса использовался один и тот же ресурс. Однако, в нашей модели имеется три этапа, где пострадавшему назначается новый ресурс. Ожидание этого ресурса (бригады ЭМП или СМП для оказания первой помощи и сортировки, санитарного автомобиля для транспортировки, освобождения бригад приемного отделения), с одной стороны, усложняет модельное описание процесса, а с другой стороны — упрощает эвристический поиск оптимального решения.

Последнее связано с тем, что указанные ожидания и представляют собой непроизводительные затраты времени. Поэтому оптимизирующий блок системы должен минимизировать именно эти затраты (ликвидируя «узкие места»).

Описание алгоритма и методики расчетов

Математическая модель для описания процесса ликвидации медицинских последствий ЧС строится на основе принятого в службе регламента.

Бригады ЭМП и/или СМП, прибывающие к месту сбора пострадавших первыми, осуществляют процесс сортировки пострадавших и оказания первой медицинской помощи, к ним в случае необходимости присоединяются и прибывающие следом бригады.

Транспортировку в стационары осуществляют бригады СМП, не задействованные в настоящий момент в процессе сортировки, после госпитализации очередного пострадавшего бригады СМП возвращаются к месту сбора для выполнения следующего наряда, если там есть ожидающие госпитализации пострадавшие.

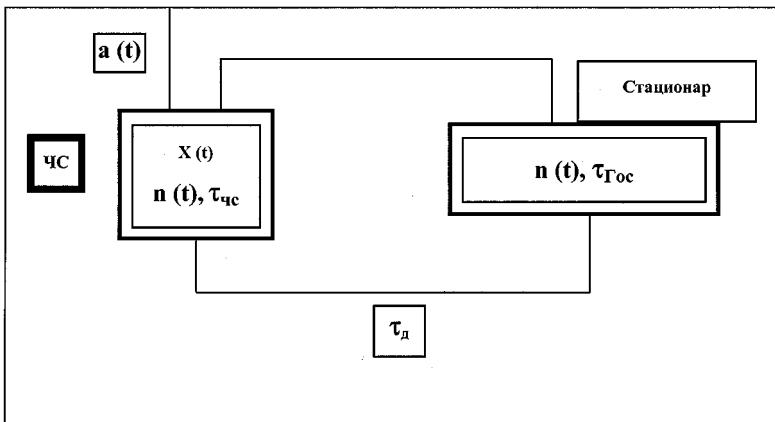
Пострадавшие сортируются на три группы: тяжелые, средней тяжести и легкие. В модели считается, что госпитализация требуется пострадавшим средней и тяжелой степени (приоритетная группа). Госпитализация пострадавших средней степени тяжести начинается после эвакуации всех тяжелых пострадавших.

Основные временные ограничения на процесс ликвидации медицинских последствий ЧС можно сформулировать так:

- время вывоза с места сбора всех тяжелых пострадавших $T_{ЧС,т} \leq 60$ мин.;
- время окончания госпитализации всех тяжелых пострадавших $T_{Гос,т} \leq 90$ мин.;
- время вывоза с места сбора всех пострадавших средней степени тяжести $T_{ЧС,ср} \leq 120$ мин.;
- время окончания госпитализации всех пострадавших средней степени тяжести $T_{Гос,ср} \leq 180$ мин.

Алгоритм для расчета всех параметров процесса сформулируем только для тяжелых пострадавших и для госпитализации только в один стационар. Этот алгоритм является основным блоком при расчете более сложных ситуаций.

Рис. 1. Схема алгоритма



К месту сбора пострадавших в произвольный момент времени « t » подходят два потока бригад (поток — количество бригад, прибывающих в заданный интервал времени):

- внешний поток бригад от подстанций СМП — $a(t)$;
- поток бригад от стационара, который определяется пропускной способностью стационара.

Второй поток не равен нулю, если в момент времени $(t - t_d - t_{\text{Гос}})$ в приемном отделении стационара находились бригады СМП, где

t_d — время проезда от стационара до места сбора пострадавших,

$t_{\text{Гос}}$ — время задержки бригад в стационаре.

Следовательно, этот поток равен $b \times q[m(t - t_d - t_{\text{Гос}})]$,

где b — константа, $q(x)$ — функция Хевисайда, равная 0 при $x <= 0$ и единице при $x > 0$.

Итак, поток бригад, прибывающих к месту ЧС — $X(t)$, имеет вид:

$$X(t) = a(t) + b \times q[m(t - t_d - t_{\text{Гос}})], \quad (1)$$

где $m(t)$ — количество пострадавших, находящихся в очереди в приемном отделении стационара.

Количество пострадавших на месте сбора, ожидающих госпитализации, определяется соотношением:

$$n(t) - n(t - \tau) = - X(t - t_{qc}), \quad (2)$$

где $n(t)$ — количество пострадавших в пункте сбора,
 t_{qc} — время задержки бригады в пункте сбора,
 τ — шаг по времени.

Количество пострадавших в очереди в приемном отделении стационара определяется соотношением:

$$m(t) - m(t - \tau) = X(t - t_{qc} - t_d) - c \times q[m(t - \tau)], \quad (3)$$

где c — скорость госпитализации пострадавших.

Количество пострадавших, госпитализированных к данному моменту времени, равно $N = (n + m)$,
где n — число пострадавших в ЧС.

Система уравнений (1)–(3) должна решаться в дискретные моменты времени $t = i \times \tau$. Вначале решается уравнение:

$$\begin{aligned} m(t) - m(t - \tau) &= \{a(t - t_d - t_{qc}) + \\ &b \times q[m(t - 2t_d - t_{loc})]\} - c \times q[m(t - \tau)], \end{aligned} \quad (5)$$

$m(t) = 0$, при $t \leq 0$

$$\begin{aligned} \text{затем } n(t) - n(t - \tau) &= - \{a(t - t_{qc}) + \\ &b \times q[m(t - t_d - t_{loc} - t_{qc})]\}, \end{aligned} \quad (6)$$

$n(t) = N$, при $t \leq 0$

Выражения (5)–(6) используются для определения решения в последовательные моменты времени до тех пор, пока $n(t)$, а затем и $m(t)$ не станут равны нулю.

Внешний поток бригад считается заданной функцией времени, и обычно обращается в ноль вне некоторого интервала времени.

Решение вопроса о времени окончания обслуживания пострадавших средней степени тяжести сводится к уже описанному решению, но начнется после госпитализации тяжелых пострадавших и будет иметь другое время t_{qc} . Рассмотрим качественный характер поведения решений при различных параметрах задачи.

Если бригад достаточно много и они непрерывно подвозят пострадавших к госпиталю, то примерное поведение решений имеет следующий вид:

Рис. 2. Примерное поведение зависимости $n(t)$

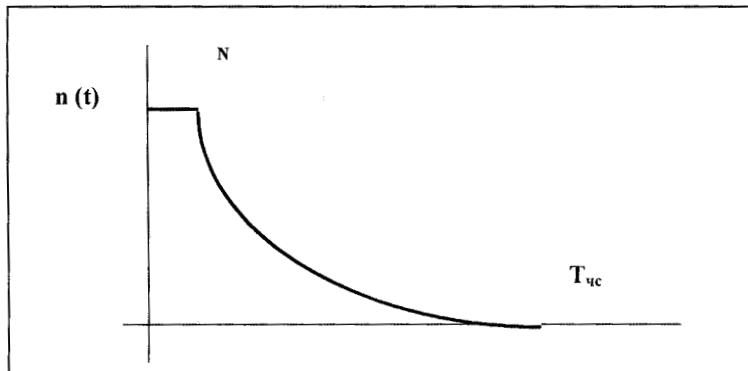
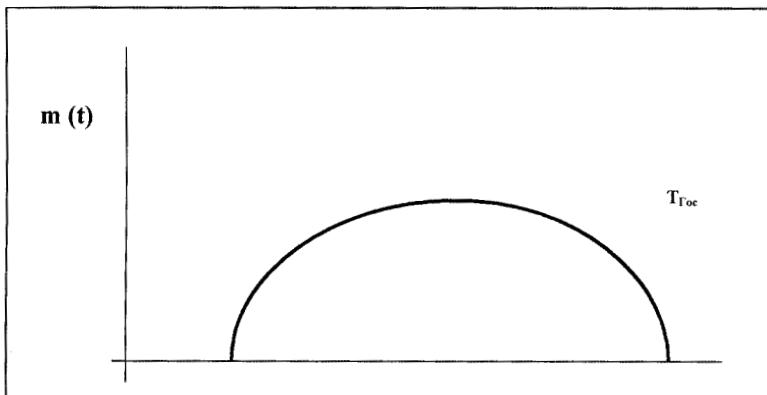


Рис.3. Примерное поведение зависимости $m(t)$



Если количество бригад СМП мало, а время доезда до госпиталя велико, то решения могут иметь вид, представленный на рисунках (рис.4 и рис.5).

Полный алгоритм решения задачи о выборе стационаров при госпитализации пострадавших в ЧС сводится к следующей последовательности расчетов:

- 1) задается структура пострадавших при ЧС;
- 2) задаются поток бригад СМП, направляемых к месту ЧС,

характерные времена обслуживания и времена доезда до выбранного стационара;

3) рассчитывается по модели, приведенной выше, процесс ликвидации медицинских последствий ЧС;

4) до достижения заданных общих временных затрат расчет повторяется при варьировании потока бригад;

5) если получающиеся решения не удовлетворяют требованиям о нормативных сроках, то необходимо рассмотреть точно такую же задачу с дополнительным стационаром (два потока с разными характерными параметрами) и т.д.

Рис. 4.

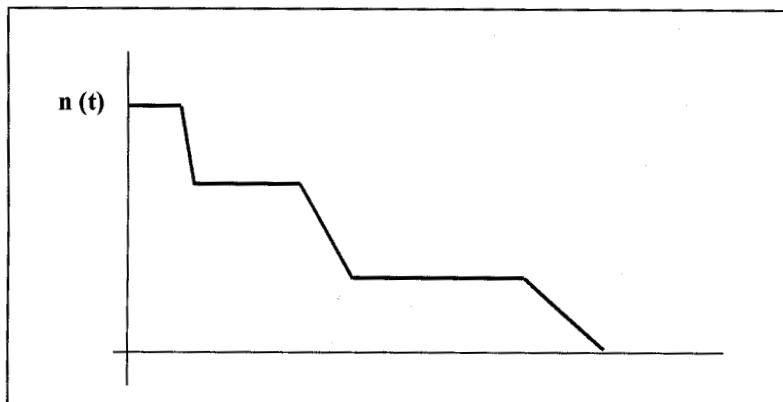
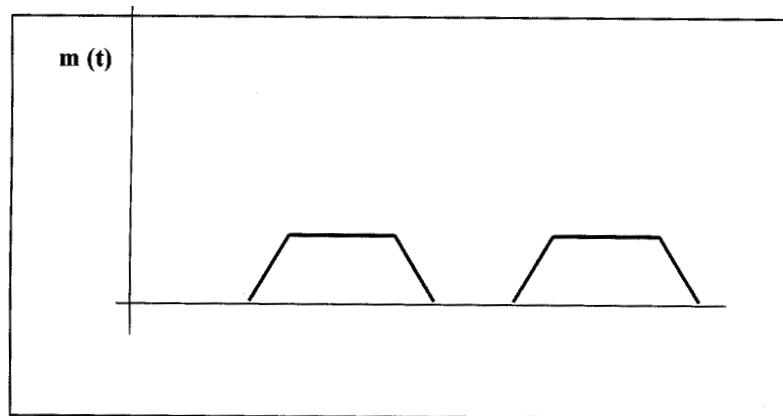


Рис. 5.



В качестве примера использования имитационных моделей ниже рассматривается гипотетическая ситуация — авария на Московском нефтеперерабатывающем заводе в Капотне.

В результате аварии, связанной с взрывом горючих веществ в одном из цехов завода, ожидаются следующие санитарные потери: пострадавших с механической травмой будет 10 человек, термической — 18 чел., химической — 5 чел. и комбинированной травмой — 17 человек. Безвозвратные потери достигнут 10 человек.

Задавая нужное нам количество пострадавших по виду повреждений и степени тяжести и подбрав число бригад СМП, направляемых к месту аварии, рассчитываем по модели процесс госпитализации. Выбираем вариант, удовлетворяющий нашим требованиям о необходимых сроках госпитализации: все тяжелые пострадавшие будут эвакуированы из зоны аварии через 35 мин., госпитализированы в специализированные отделения стационаров через 82 мин., все пострадавшие средней степени тяжести — через 45 мин. и 108 мин., соответственно.

При этом будут задействованы стационары №№7, 15, 68, 79 для приема пострадавших с механической и комбинированной травмой, НИИ им.Н.В.Склифосовского и ГКБ №36 для приема пострадавших с ожогами и комбинированной травмой.

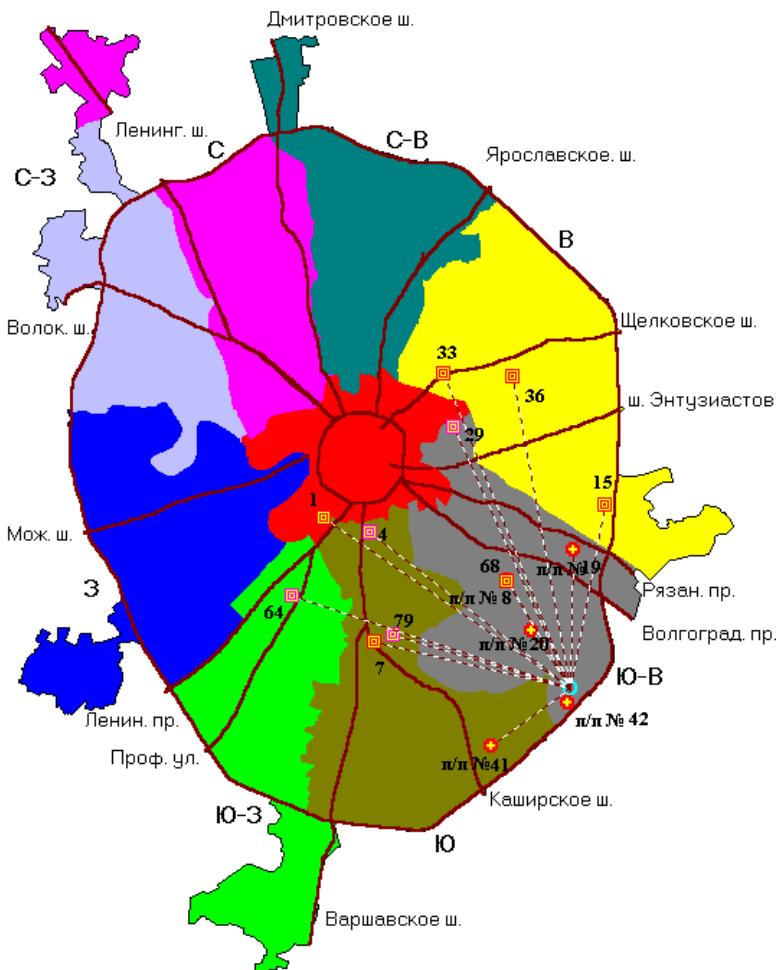
Пострадавшие с химической травмой будут госпитализированы в Центр по лечению отравлений НИИ им.Н.В.Склифосовского и ГКБ №33 (схема 1).

Госпитализация легко пострадавших (госпитализация во вторую очередь) осуществляется во вспомогательные стационары службы ЭМП ГКБ №№13, 53, 56, более удаленные от места аварии, т.к. в ближайшие стационары возможно поступление «самотеком».

При гипотетической аварии с выбросом хлора на объекте АО «Синтез», занимающимся переработкой и хранением хлора, ожидаются следующие санитарные потери: 32 чел. окажутся в тяжелом состоянии, 65 — в состоянии средней тяжести и у 228 будет легкая степень поражения. С помощью математической модели рассчитывается процесс ликвидации медицинских последствий данной ЧС.

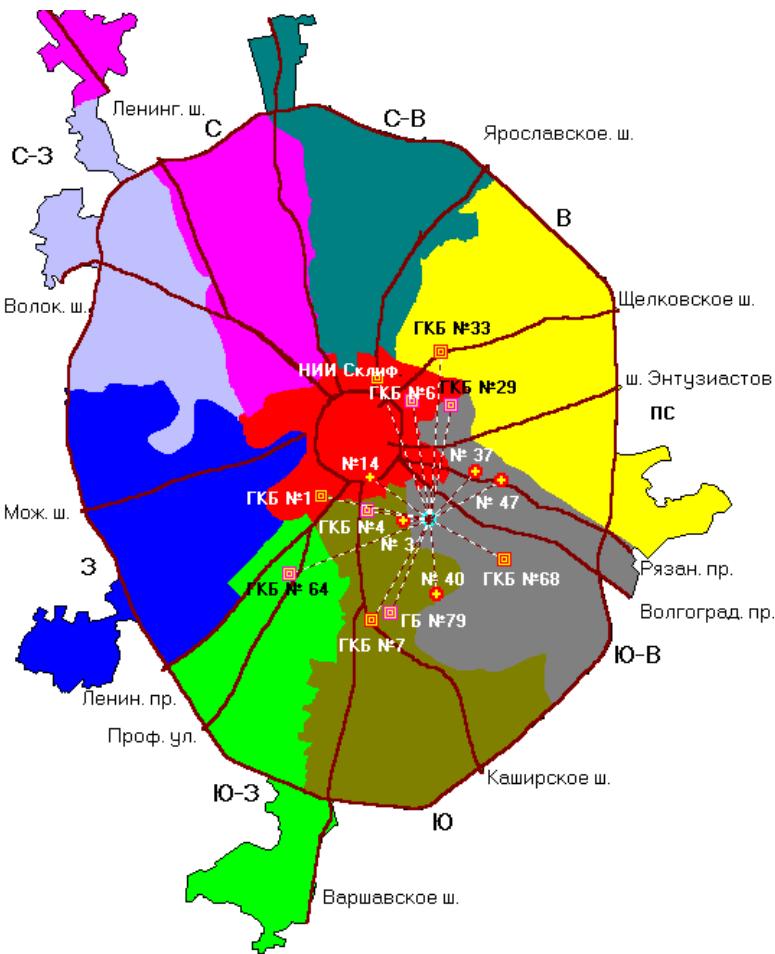
Расчет медицинских сил и средств для ликвидации последствий аварии определялся исходя из числа пострадавших, структурного распределения их по тяжести поражения, а также допустимого времени оказания пострадавшим экстренной медицинской помощи (максимальный интервал времени с момента поражения до момента госпитализации).

Схема 1. Возможный вариант госпитализации пострадавших при пожаре на нефтеперерабатывающем заводе в Капотне



Для пострадавших с тяжелой и средней степенью тяжести поражения (97 чел.) выбираются базовые и резервные стационары СЭМП, находящиеся вне зоны поражения и развертывающие койки для химической травмы — НИИ СП им. Н. В. Склифосовского, ГКБ №№33, 29, 1, 4, 7, 68, 79 (Схема2). Задается поток бригад СМП с характерными временами обслуживания и доезда до выбранных стационаров.

Схема 2. Ликвидация последствий ЧС в НПО «Синтез»



Выбираем вариант, удовлетворяющий нашим требованиям о необходимых сроках госпитализации: все тяжелые пострадавшие будут эвакуированы из зоны аварии через 40 мин., госпитализированы в специализированные отделения стационаров через 64 мин., все пострадавшие средней степени тяжести — через 90 мин. и 109 мин., соответственно. Получившееся решение удовлетворяет нашим требованиям о нормативных сроках эвакуации пострадавших при аварии с выбросом хлора.

Эксперименты, проведенные на имитационных моделях, позволили оценить (по принятым критериям оперативности) эффективность принимаемых в ЧС управленческих решений, касающихся мощности привлекаемых медицинских сил и их структуры, а также позволили разработать прогнозные сценарии ликвидации медицинских последствий ЧС.

Разработка четких вариантов организации экстренной медицинской помощи и проведение с помощью математической модели расчетов медицинских сил, необходимых для ликвидации медицинских последствий техногенных аварий на конкретных крупных химико- и взрывопожароопасных промышленных объектах, позволит обеспечить своевременное оказание медико-санитарной помощи и реализовать комплексные меры по повышению готовности городского здравоохранения к адекватному реагированию на происшествия с угрозой жизни и здоровью людей.

НПЦ ЭМП
Тираж 100 экз.