

УДК 681.5:614.8:519.87

doi: 10.53816/23061456_2025_11–12_77

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АЛГОРИТМА КАНА В ЗАДАЧЕ ПРИМЕНЕНИЯ СИЛ, ПРИВЛЕКАЕМЫХ ДЛЯ ЛИКВИДАЦИИ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ

USING THE KANA ALGORITHM IN THE TASK OF APPLYING FORCES TO ELIMINATE EMERGENCY SITUATIONS

Канд. техн. наук Г.А. Шарипов

Ph.D. G.A. Sharipov

Академия гражданской защиты МЧС России

В статье исследовано применение алгоритма Кана как ключевого инструмента построения сетевых моделей управления процессами ликвидации чрезвычайных ситуаций, связанных с разрушением зданий и сооружений. На основе анализа принципов топологической сортировки и существующих подходов оптимизации ресурсов предложена математическая модель применения сил, привлекаемых при проведениях аварийно-спасательных работ, ориентированная на минимизацию общего времени их проведения. В работе также рассматривается интеграция алгоритма Кана с методами PERT и CPM, их совместное применение для повышения эффективности управления ликвидацией чрезвычайных ситуаций. Представлены практические рекомендации по использованию данного алгоритма в автоматизированных системах управления МЧС России.

Ключевые слова: алгоритм Кана, чрезвычайная ситуация, ликвидация, распределение сил и средств, оптимизация, сетевое планирование, математическое моделирование, здания и сооружения, аварийно-спасательные и другие неотложные работы.

The article explores the application of the Kahn's Algorithm as a key tool for building network models of emergency response management in cases of building and structure destruction. Based on an analysis of topological sorting principles and existing resource optimization approaches, a mathematical model is proposed for the application of forces involved in emergency rescue operations, aimed at minimizing the overall time required for their execution. The article also discusses the integration of the Kahn's Algorithm with PERT and CPM methods and their combined use to enhance the efficiency of emergency response management. Practical recommendations for using this algorithm in automated control systems of the Russian Ministry of Emergency Situations are presented.

Keywords: Kahn's Algorithm, emergency situation, elimination, distribution of forces and resources, optimization, network planning, mathematical modeling, buildings and structures, emergency rescue and other urgent works.

Несмотря на технологический прогресс, количество чрезвычайных ситуаций (ЧС), связанных с разрушением зданий, не снижается, а доля человеческих жертв от них составляет более 90 % от общего числа погибших при техногенных

ЧС [1]. Проблема снижения количества человеческих жертв в ЧС, связанных с разрушением зданий и сооружений, является актуальной, а применение сил проведения аварийно-спасательных работ (АСР) должно быть направлено на оптимизацию

существующих методов и подходов на снижение времени ликвидации ЧС. Снижение времени проведения АСР существенно уменьшает количество погибших и пострадавших, и уменьшает экономический ущерб.

На ранних этапах исследование управления ликвидацией ЧС строилось преимущественно на эмпирических подходах, где последовательность действий определялась нормативно, а ресурсы распределялись по фиксированным планам. Однако по мере усложнения сценариев катастроф стало очевидно, что статические схемы теряют эффективность в условиях изменяющейся обстановки. Современные методы ориентированы на создание адаптивных моделей, позволяющих учитывать пространственно-временные зависимости между этапами ликвидации ЧС, связанных с разрушением зданий и сооружений, ограниченностью привлекаемых сил и средств и многокритериальностью принимаемых решений.

Одной из ключевых тенденций последних лет стало развитие интеллектуальных систем поддержки принятия решений, способных в реальном времени адаптировать планы реагирования. Согласно современным исследованиям в области управления рисками и техносферной безопасности [2–6], эффективность АСР напрямую зависит от точности временной и логической синхронизации между подразделениями, а также от способности системы быстро перестраивать последовательность действий при поступлении новой информации о развитии ситуации.

В этих условиях особое значение приобретает моделирование процессов ликвидации ЧС на основе теории графов. Представление операций в виде ориентированного ациклического графа позволяет формализовать взаимосвязи между задачами, выявлять критические операции и определять оптимальную последовательность выполнения работ. Среди алгоритмических инструментов особое место занимает алгоритм Кана, обеспечивающий корректное построение топологического порядка операций без образования циклов и логических конфликтов. Этот механизм особенно эффективен для задач динамического распределения сил, когда зависимость между действиями изменяется во времени. Методы сетевого планирования при организации ликвидации ЧС представляют со-

бой эффективный инструмент управления, обеспечивающий оптимизацию временных, материальных и человеческих ресурсов. Сетевой граф формирует логико-временную структуру технологических операций, необходимых для устранения последствий ЧС. Такая модель позволяет выявить критические звенья, определить взаимосвязи между видами АСР и спрогнозировать сроки достижения конечных целей ликвидации.

Каждая операция сетевого графа ликвидации ЧС, связанной с разрушением зданий, представляет собой отдельный этап проведения элементов аварийно-спасательных и других неотложных работ (АСДНР). Она охватывает такие направления деятельности, как локализация опасных факторов, оказание помощи пострадавшим, разбор завалов и организации жизнеобеспечения. Построение сетевой модели обеспечивает формирование единой структурированной схемы, отражающей взаимосвязь всех технологических операций.

Построим граф выполнения технологических операций, проводимых при ЧС, связанных с разрушением зданий и сооружений (рис. 1).

Каждая технологическая операция имеет четко определенную иерархию и последовательность выполнения, что гарантирует согласованность действий всех подразделений и исключает нарушение технологической логики. При этом отдельные элементы в технологической операции могут быть скорректированы в зависимости от характера и масштаба ЧС, что позволяет гибко адаптировать процесс ликвидации к реальной оперативной обстановке.

На основе представленного на рис. 1 графа построена диаграмма Ганта ликвидации ЧС с указанием длительности операций и времени ликвидации ЧС (рис. 2).

Используем алгоритм Кана к задаче применения сил, привлекаемых для ликвидации ЧС, связанной с разрушением здания, что открывает возможности интеграции структурного анализа и оптимизационного моделирования, формируя основу для интеллектуальных подсистем поддержки решений в МЧС России. В отличие от традиционных методов линейного или динамического программирования, он ориентирован на структурно-логическое описание процессов и способен быстро адаптироваться к изменению параметров модели применения привлекаемых

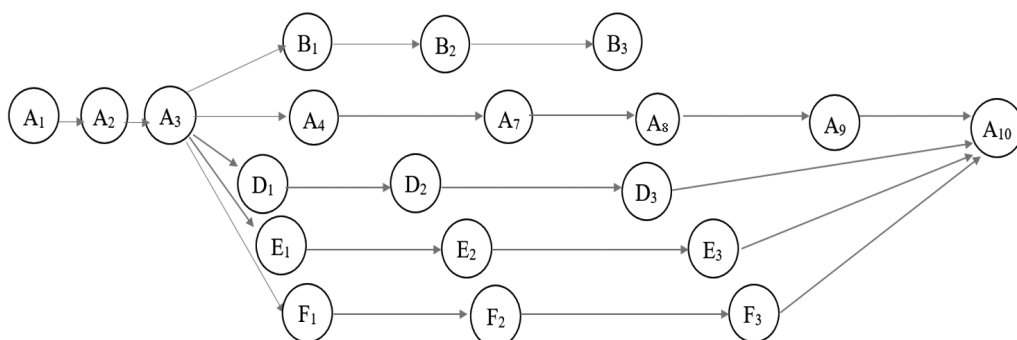


Рис. 1. Граф выполнения технологических операций, по ликвидации ЧС, связанных с разрушением зданий и сооружений: A_1-A_3 — организация разведки в зоне ЧС, оценка обстановки и прогнозирование ее развития; A_4-A_{10} — укрепление или обрушение неустойчивых конструкций, поиск пострадавших, разборка завалов, деблокирование, вскрытие разрушенных, поврежденных, заваленных зданий, и спасение находящихся в них людей, извлечение пострадавших из разрушенных элементов зданий и сооружений и др.; B_1-B_3 — тушение пожара на участках ввода сил и средств; D_1-D_3 — локализация аварий на газовых сетях; E_1-E_3 — локализация аварий на электрических сетях; F_1-F_3 — локализация аварий на водопроводно-канализационных (тепловых) сетях

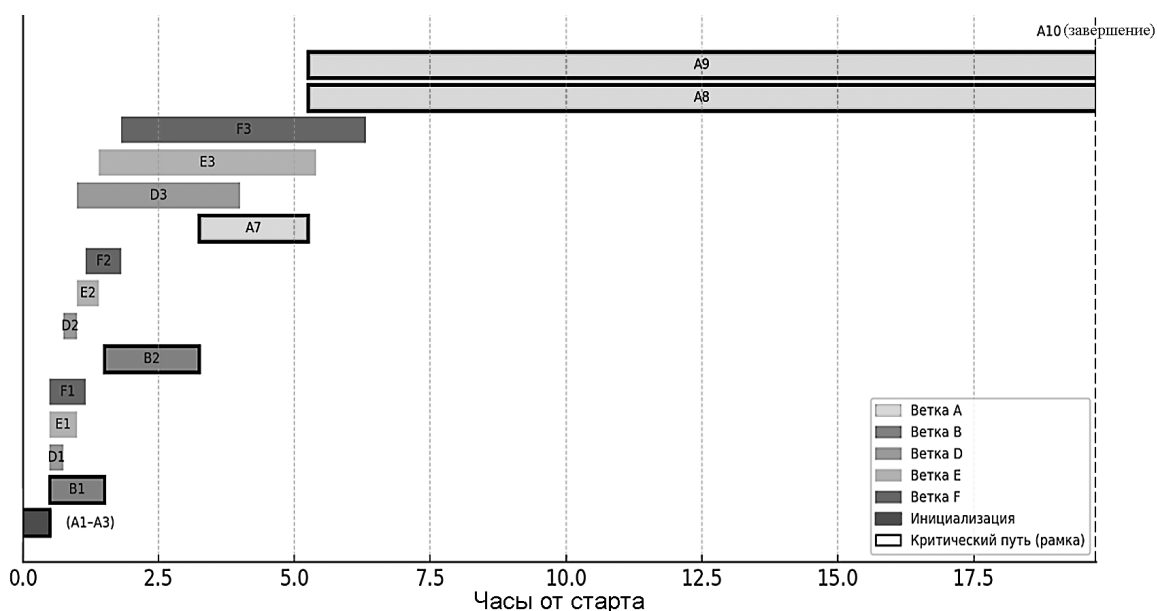


Рис. 2. Диаграмма Ганта технологических операций ликвидации ЧС, связанной с разрушением зданий и сооружений

сил ликвидации ЧС. Данный подход полностью соответствует концепции «единого цифрового пространства управления рисками», ориентированного на автоматизацию планирования, синхронизацию привлекаемых сил и средств, и прогнозирование сценариев реагирования в реальном времени ликвидации ЧС.

В научных трудах зарубежных и отечественных исследователей [7–10] отмечается эффективность топологических методов в задачах распределения ресурсов при множественных временных и пространственных ограничениях.

Настоящее исследование направлено на обоснование возможностей интеграции алгоритма Кана в модель распределения привлекаемых сил ликвидации ЧС, связанной с разрушениями зданий и сооружений, что позволяет объединить последовательность и временную оптимальность в едином математическом контуре управления.

Для практической реализации алгоритма Кана в управлении ликвидацией ЧС, связанной с разрушением зданий и сооружений, разработана математическая модель оптимального распределения ресурсов.

Пусть имеется:

$$Z = \{z_{1\text{фп}}, z_{2\text{зд}}, z_{3\text{этаж}}, z_{4\text{кон}}, z_{5\text{нис}}, z_{6\text{ст.р}}, \dots, z_f, \dots, z_k\} —$$

множества характеристик разрушенного здания, на котором необходимо выполнить АСР в ходе ликвидации ЧС:

$z_{1\text{фп}}$ — функциональное предназначение;

$z_{2\text{зд}}$ — вид объекта;

$z_{3\text{этаж}}$ — этажность строения;

$z_{4\text{кон}}$ — конструктивные особенности;

$z_{5\text{нис}}$ — наличие инженерных систем;

$z_{6\text{ст.р}}$ — степень разрушения;

z_f — характеристика разрушенного здания;

k — характеристики разрушений;

$N = \{n_1, n_2, \dots, n_i, \dots, n_p\}$ — множества видов работ (технологических операций), которые необходимо выполнить в ходе ликвидации ЧС: тушение пожара, вскрытие, разбор, инженерная стабилизация и т.д.;

n_i — наименование i -й работы;

p — виды работ, $i = \overline{1, N}$;

$W = \{w_1, w_2, \dots, w_q, \dots, w_y\}$ — множества подразделений привлекаемых сил ликвидации ЧС: МЧС, МВД, войска национальной гвардии (ВНГ), аварийно-спасательные службы (АСС) и др.;

w_q — наименование q -го подразделения;

y — виды подразделений; $q = \overline{1, W}$;

$M = \{m_1, m_2, \dots, m_j, \dots, m_d\}$ — множества спасательных звеньев в привлекаемых подразделениях для проведения АСР: ГДЗС, инженерные, спасательные и др.;

m_j — j -е спасательное звено;

d — виды звеньев; $j = \overline{1, M}$;

$V = \{v_1, v_2, \dots, v_i, \dots, v_n\}$ — объем работ, (разбор завалов, м³; тушение пожара, м²);

v_i — объем i -й работы;

\overline{n} — работы в технологической операции; $v = \overline{1, V}$;

$U = \{u_1, u_2, \dots, u_h, \dots, u_n\}$ — множества участков проведения работ: подъезд здания, секция, завал и др.;

u_h — наименование h -го участка;

\overline{n} — виды участков проведения работ; $h = \overline{1, U}$;

$P = \{p_{1,j,i}^q, p_{2,j,i}^q, \dots, p_{j,i}^q, \dots, p_{j,i}^y\}$ — производительность j -го звена при выполнении i -й работы (разбор завалов, чел. час.; тушение пожара, м²);

$p_{j,i}^q$ — наименование q -го подразделения;

y — виды подразделений;

$G = \{g_1, g_2, \dots, g_r, \dots, g_v\}$ — последовательность выполнения спасательной операции, то есть АСР; $r = \overline{1, G}$.

Необходимо распределить все спасательные звенья между всеми работами и определить порядок перемещения привлекаемых сил между работами в технологической операции, таким образом, чтобы время выполнения всего комплекса работы по ликвидации ЧС, было минимальным.

$$T_{\text{ликв}} = f(Z, W, M, U, P, N, V) \rightarrow \min_{W, N};$$

$$T_{\text{ликв}} = t_{\text{ТО1}} + t_{\text{ТО2}} + t_{\text{ТО3}} + \dots + t_{\text{ТО}n},$$

где $t_{\text{ТО}}$ — время выполнения технологической операции, при следующих ограничениях и допущениях:

$$\sum_{i=1}^i x_{j,i}(t) \leq 1 — \text{спасательное звено } j \text{ привлекаемых сил ликвидации ЧС в каждый момент времени } t \text{ может выполнять не более одной работы в технологической операции, либо не выполняет никакую, где } x_{j,i} — \text{бинарная переменная, равная 1, если } i\text{-я работа выполняется } j\text{-м подразделением, и 0 в противном случае. Ограничение обеспечивает корректность распределения задач и соблюдение топологических зависимостей;}$$

Ограничение обеспечивает корректность распределения задач и соблюдение топологических зависимостей;

$$\sum_{j=1}^j x_{j,i}(t) \geq 1 — \text{каждая последующая } i\text{-я ра}$$

бота в технологической операции на момент времени t может выполняться как одним или несколькими спасательными звеньями, привлекаемых сил ликвидации ЧС, так и не выполняться.

Следует отметить, что в научных трудах [11–13] подробно рассматриваются методы линейного и нелинейного программирования, включая симплекс-метод, геометрический метод и метод Франка-Вульфа, как эффективные способы решения задач оптимизации. Однако, в отличие от этих подходов, алгоритм Кана не ограничивается поиском экстремума функции, а обеспечивает сохранение логической структуры взаимозависимостей между технологическими операциями, что делает его особенно полезным при динамическом распределении сил в условиях ЧС.

Решение данной задачи обеспечивает минимизацию общего времени реагирования T , при

этом последовательность выполнения АСДНР в технологических операциях определяется алгоритмом Кана. Такой подход позволяет согласовать логическую и временную составляющие процесса планирования [11].

После построения топологической структуры с помощью алгоритма Кана осуществляется временной анализ, который обеспечивает расчет ключевых временных характеристик: ранних и поздних сроков начала и окончания операций, а также резервов времени.

Проведем решение задачи с использованием алгоритма Кана при заданных:

1. $V = 120, 80, 150, 60, 90$ — объемы работы.

2. $P_{j,i}$ — производительность j -го спасательного звена привлекаемых сил ликвидации ЧС для выполнения i -й работы (тушение пожара, м²; вскрытие заблокированных помещений, чел.·час; укрепление и обрушение элементов конструкций зданий и сооружений, представляющих угрозу для пострадавших и спасателей чел.·час; разбор завалов, м³; локализация аварий на коммунально-энергетических сетях чел.·час; спасание пострадавших чел.·час (табл. 1).

3. G — последовательность выполнения работ в технологической операции, представлена матрицей смежности для ориентированного невзвешенного графа: 1→3; 2→3; 2→5; 3→4 (табл. 2 и рис. 3).

Таблица 1

Производительность спасательных звеньев выполнения работ при ликвидации ЧС

№	Производительность, чел.·час	Виды работ				
		1	2	3	4	5
1	Первое звено	10	9	12	8	7
2	Второе звено	8	11	9	10	9
3	Третье звено	7	8	10	12	11
4	Четвертое звено	9	10	8	9	12

Таблица 2

Процесс выполнения взаимосвязанной работы

Вершина	Степень
1	0
2	0
3	2-1=1
4	1
5	1

Таблица 3

Процесс выполнения взаимосвязанной работы

Вершина	Степень
2	0
3	1-1=0
4	1
5	1-1=0

Таблица 4

Процесс выполнения взаимосвязанной работы

Вершина	Степень
3	0
4	1-1=0
5	0

Таблица 5

Процесс выполнения взаимосвязанной работы

Вершина	Степень
4	0

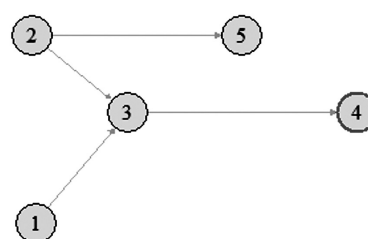


Рис. 3. Сетевой график выполнения работ n -ой технологической операции:

1 — установка боковых опор; 2 — выравнивание отклонений и прогибов стен; 3 — прикрепление выровненных стен; 4 — установка крепи; 5 — связывание продольных и поперечных стен

Рассмотрим такую технологическую операцию, как укрепление неустойчивых элементов конструкций, представляющих угрозу жизни для пострадавших и спасателей при ЧС, связанной с разрушением здания (рис. 3).

Решение задачи.

Шаг 1. Проводим линейное упорядочивание вершин ориентированного графа G по выполнению привлекаемыми силами АСДНР работ (рис. 3).

Находим все вершины с нулевой входящей степенью (то есть те, в которые не входят стрелки), добавляем их в очередь выполнения предшествующих и последующих работ технологической сети. Удаляем вершину из графа, уменьшая входящие степени ее соседей. Повторяем процесс выполнения взаимосвязанной работы, пока не обработаем все вершины (табл. 2–5).

Результат: топологическая сортировка выполнения АСДНР 1→2→3→5→4. В этой последовательности будем назначать исполнителей из числа спасательных звеньев привлекаемых сил ликвидации ЧС.

Шаг 2.

2.1. Момент времени 0 часов. Все спасательные звенья из числа привлекаемых сил ликвидации ЧС свободны. Назначаем исполнителей из числа спасательных звеньев на выполнение первой и второй работ технологической операций (табл. 6).

Используем время завершения работы $i = 2$, равное $t_2 = 4,21$ часа, для квантования общего времени и остаточных объемов работ. Рассчитаем, какие объемы остались у каждой работы (табл. 7).

2.2. Момент времени 4,21 часа. К этому моменту освободились спасательные звенья $i = 2$ и 3. Они способны выполнить еще незавершенную работу $i = 1$ (табл. 8).

Используем время завершения первой работы $i = 1$, равное $t_1 = 5,38$ часа, для квантования общего времени и остаточных объемов последующих работ технологической операции.

Рассчитаем, какие объемы остались у последующих работ (табл. 9).

2.3. Момент времени $t_1 = 5,38$ часа. Все спасательные звенья свободны. В топологической сортировке после работ $i = 1$ и 2 следует работа $i = 3$, на которую можно назначить все спасательные звенья сразу (табл. 10).

Используем время завершения работы $i = 3$, равное $t_3 = 9,22$ часа, для квантования общего времени выполнения третьей работы и остаточных объемов последующих работ (табл. 11).

Таблица 6

Назначение исполнителей из числа спасательных звеньев

Работа, объем	Исполнители, их производительность, P_{ij}				Оценка времени
$i = 1$ (120 ч)	$P_{1,1} = 10$	–	–	$P_{4,1} = 9$	$t_1 = 120/19 = 6,31$ часа
$i = 2$ (80 ч)	–	$P_{2,2} = 11$	$P_{3,2} = 8$	–	$t_2 = 80/19 = 4,21$ часа

Таблица 7

Виды работ и их объем

$i = 1$	$i = 2$	$i = 3$	$i = 4$	$i = 5$
$V_1 = 120 - (19 \cdot 4,21) = 40,01$	$V_2 = 0$	$V_3 = 150$	$V_4 = 60$	$V_5 = 90$

Таблица 8

Назначение исполнителей из числа спасательных звеньев

Работа, объем	Исполнители, их производительность, P_{ij}				Оценка времени
$i = 1$ (40,01 ч)	$P_{1,1} = 10$	$P_{2,1} = 8$	$P_{3,1} = 7$	$P_{4,1} = 9$	$t_1 = t_2 + 40,01/34 = 5,38$ часа

Таблица 9

Виды работ и их объем

$i = 1$	$i = 2$	$i = 3$	$i = 4$	$i = 5$
$V_1 = 0$	$V_2 = 0$	$V_3 = 150$	$V_4 = 60$	$V_5 = 90$

Таблица 10

Назначение исполнителей из числа спасательных звеньев

Работа, объем	Исполнители, их производительность, P_{ij}				Оценка времени
$i = 3$ (150 ч)	$P_{1,3} = 12$	$P_{2,3} = 9$	$P_{3,3} = 10$	$P_{4,3} = 8$	$t_3 = t_1 + 150/39 = 5,38 + 3,84 = 9,22$ часа

Таблица 11

Виды работ и их объем

$i = 1$	$i = 2$	$i = 3$	$i = 4$	$i = 5$
$V_1 = 0$	$V_2 = 0$	$V_3 = 0$	$V_4 = 60$	$V_5 = 90$

2.4. Момент времени $t_3 = 9,22$ часа. Все привлекаемые силы завершили третью работу. В топологической сортировке после работы $i = 3$ следует работа $i = 5$ на которую можно назначить все спасательные звенья одновременно (табл. 12).

Используем время завершения $i = 5$ работы, равное $t_5 = 11,52$ часа, для квантования оставшегося времени. Рассчитаем, какие объемы остались у последующих работ (табл. 13).

2.5. Момент времени 11,52 час. Все спасательные звенья свободны. В топологической сортировке после работы $i = 5$ следует работа $i = 4$, на выполнение которой следует назначить все привлекаемые силы сразу (табл. 14).

Все работы АСДНР завершены (табл. 15).

2.6. Момент времени 13,05 час — завершение всего комплекса работ технологической операций.

Шаг 3. Формируем сводный план назначения спасательных звеньев из числа привлекаемых сил ликвидации ЧС на выполнение работ n -ой технологической операций (табл. 16).

Был выполнен сравнительный анализ двух вариантов выполнения технологических операций, входящих в структуру сетевого графа организации АСР (рис. 4).

Первый, классический вариант выполнения АСДНР, при котором общая продолжительность выполнения работ составила 20,19 часа.

Второй вариант с использованием алгоритма Кана, моделирует сценарий оперативной обстановки, при котором общая продолжительность выполнения АСДНР равна 13,05 час. Что означает сокращение времени АСДНР на 35 %.

Предложенный подход обеспечивает уменьшение времени АСДНР и уточнения планов лик-

Таблица 12

Назначение спасателей из числа спасательных звеньев

Работа, объем	Исполнители, их производительность, P_{ij}				Оценка времени
$i = 5$ (90 ч)	$P_{1,5} = 7$	$P_{2,5} = 9$	$P_{3,5} = 11$	$P_{4,5} = 12$	$t_5 = t_3 + 90/39 = 9,22 + 2,30 = 11,52$ часа

Таблица 13

Виды работ и их объем

$i = 1$	$i = 2$	$i = 3$	$i = 4$	$i = 5$
$V_1 = 0$	$V_2 = 0$	$V_3 = 0$	$V_4 = 60$	$V_5 = 0$

Таблица 14

Назначение спасателей из числа спасательных звеньев

Работа, объем	Исполнители, их производительность, P_{ij}				Оценка времени
$i = 4$ (60 ч)	$P_{1,5} = 8$	$P_{2,5} = 10$	$P_{3,5} = 12$	$P_{4,5} = 9$	$t_4 = t_5 + 60/39 = 11,55 + 1,53 = 13,09$ часа

Таблица 15

Виды работ и их объем

$i = 1$	$i = 2$	$i = 3$	$i = 4$	$i = 5$
$V_1 = 0$	$V_2 = 0$	$V_3 = 0$	$V_4 = 0$	$V_5 = 0$

Таблица 16

Формирование сводного плана назначения спасательных звеньев

Диапазон времени, час	Назначенные привлекаемые силы ликвидации ЧС				
	работа 1	работа 2	работа 3	работа 4	работа 5
0–4,21	1, 4	2, 3			
4,21–5,38	1, 2, 3, 4				
5,38–9,22			1, 2, 3, 4		
9,22–11,52					1, 2, 3, 4
11,52–13,05				1, 2, 3, 4	

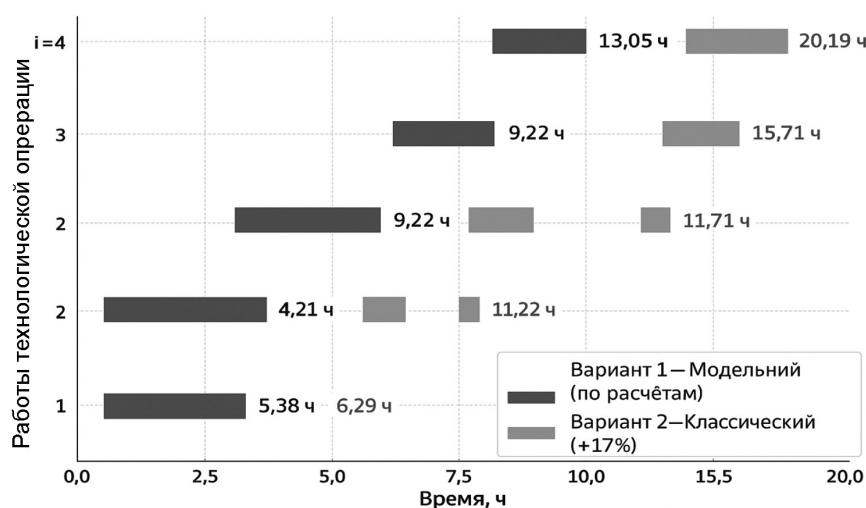


Рис. 4. Диаграмма сравнения классического и модельного вариантов выполнения работ

видации ЧС при изменении условий оперативной обстановки.

Научная новизна работы заключается в адаптации алгоритма Кана к условиям динамической оптимизации распределения ресурсов при проведении АСДНР, включая возможность учета стохастических факторов, временных задержек и вероятности отказов. В отличие от классических методов линейного программирования, предложенная модель обладает когнитивными свойствами — она позволяет адаптировать проведение АСДНР к изменениям внешних условий, сохраняя при этом структурную целостность сетевой модели. Это делает ее особенно перспективной для построения цифровых двойников систем управления и рационального распределения привлекаемых сил ликвидации ЧС.

Практическая значимость работы заключается в возможности внедрения разработанных подходов в автоматизированные системы управления МЧС России и региональных центров реагирования для оптимизации системы управления сил привлекаемых для ликвидации ЧС. Проведение расчетов АСДНР с использованием алгоритма Кана позволяет повысить точность временной координации действий привлекаемых подразделений единой государственной системы предупреждения и ликвидации ЧС, минимизировать риски дублирования задач и оптимизировать использование привлекаемых сил средств.

Перспективы дальнейших исследований связаны с расширением модели за счет интеграции эвристических и стохастических алгоритмов по проведению АСДНР в условиях неопределенности. Таким образом, предложенный подход формирует методологическую основу для построения интеллектуальных систем поддержки принятия решений и рационального варианта применения привлекаемых сил ликвидации ЧС, связанной с разрушением зданий и сооружений.

Список источников

1. Маштаков В.А., Кондашов А.А., Удацкова Е.Ю., Бобринев Е.В. Подходы к оценке эффективности деятельности сил и средств РСЧС // Научные и образовательные проблемы гражданской защиты. 2020. № 4 (47). С. 71–76.
2. Рыбаков А.В., Иванов Е.В., Хидирлясов Т.М. и др. Методический подход к формированию модели оценки эффективности проведения аварийно-спасательных работ при разрушении зданий // Технологии гражданской безопасности. 2023. Т. 20, № 2 (76). С. 57–66.
3. Родичев В.А. Математические модели и алгоритмы для автоматизированного управления процессами ликвидации чрезвычайных ситуаций: специальность 05.13.01 «Системный анализ, управление и обработка информации (по отраслям)»: дисс. на соис. уч. степени канд. физ.-мат. наук. Саратов, 2006. 167 с.

4. Полякова Н.М. Оптимизация процессов оперативного реагирования сил и средств МЧС России на чрезвычайные ситуации с применением методов исследования операций // *Мировая наука*. 2022. № 1 (58). С. 142–148.

5. Хидирлясов Т.М., Рыбаков А.В., Иванов Е.В. и др. О методике обоснования рационального варианта распределения сил гражданской обороны для проведения аварийно-спасательных работ при разрушении зданий // *Технологии гражданской безопасности*. 2023. Т. 20, № 4 (78). С. 16–25.

6. Рыбаков А.В., Иванов Е.В., Петренко П.П. и др. Задача обоснования рациональных параметров оповещения спасателей при проведении аварийно-спасательных работ // *Технологии гражданской безопасности*. 2024. Т. 21, № 3 (81). С. 101–106.

7. Kahn A.B. Topological sorting of large networks // *Communications of the ACM*. 1962. Vol. 5 (11). Pp. 558–562.

8. Каменецкая Н.В., Медведева О.М., Голубчикова А.А. и др. Оптимизация процессов оперативного реагирования сил и средств МЧС России на чрезвычайные ситуации с применением метода последовательного анализа // *Приоритетные направления инновационной деятельности в промышленности; сб. науч. ст. по итогам VII Межд. науч. конф., Казань, 30–31 июля 2020 года*. Ч. 1. Казань: «КОНВЕРТ», 2020. С. 45–49.

9. Шарипов Г.А., Мазаник А.И., Рыбаков А.В. Анализ проблемной ситуации применения сил при проведении аварийно-спасательных работ в условиях разрушения зданий и сооружений // *Технологии гражданской безопасности*. 2025. Т. 22, № 3 (85). С. 45–50.

10. Заворотный А.Г., Кострубицкий А.А., Ломакин М.И. Модель оценки эффективности мероприятий защиты населения в чрезвычайных ситуациях техногенного характера / *Гражданская оборона на страже мира и безопасности* // *Материалы VIII МНПК, посвященной Всемирному дню гражданской обороны: в 5-ти частях*, Москва, 01 марта 2024 года. М.: Академия Государственной противопожарной службы, 2024. С. 175–181.

11. Бахтиярова О.Н., Птицына И.В., Подзорова М.И. Применение симплекс-метода для решения задач линейного программирования в курсе дисциплин «Исследование операций»

и «Методы оптимизации» // *Modern European Researches*. 2023. Т. 1, № 3. С. 5–16.

12. Самороковский А.Ф. Модель оптимального распределения ресурса оперативным штабом при проведении эвакуации в условиях возникновения чрезвычайной ситуации // *Вестник Воронежского института МВД России*. 2021. № 1. С. 122–130.

13. Пархомчик Э.А., Пономарев А.И. Комплексная методика обоснования рациональной группировки сил и средств, привлекаемой для ликвидации чрезвычайной ситуации в военное время // *Научные и образовательные проблемы гражданской защиты*. 2019. № 2 (41). С. 61–68.

References

1. Mashtakov V.A., Kondashov A.A., Udavczova E.Yu., Bobrinev E.V. Podxody` k ocenke e`ffektivnosti deyatel`nosti sil i sredstv RSChS // *Nauchny`e i obrazovatel`ny`e problemy` grazhdanskoj zashchity`*. 2020. No 4 (47). Pp. 71–76.

2. Ry`bakov A.V., Ivanov E.V., Xidirlyasov T.M. et al. Metodicheskiy podxod k formirovaniyu modeli ocenki e`ffektivnosti provedeniya avarijno-spasatel`ny`x rabot pri razrushenii zdaniy // *Texnologii grazhdanskoj bezopasnosti*. 2023. Vol. 20, No 2(76). Pp. 57–66.

3. Rodichev V.A. Matematicheskie modeli i algoritmy` dlya avtomatizirovannogo upravleniya processami likvidacii chrezvy`chajny`x situacij: special`nost` 05.13.01 «Sistemny`j analiz, upravlenie i obrabotka informacii (po otraslyam)»: dissertaciya na soiskanie uchenoj stepeni kandidata fiziko-matematicheskix nauk. Saratov, 2006. 167 p.

4. Polyakova N.M. Optimizaciya processov operativnogo reagirovaniya sil i sredstv MChS Rossii na chrezvy`chajny`e situacii s primeneniem metodov issledovaniya operacij // *Mirovaya nauka*. 2022. No 1 (58). Pp. 142–148.

5. Xidirlyasov T.M., Rybakov A.V., Ivanov E.V. O metodike obosnovaniya racional`nogo varianta raspredeleniya sil grazhdanskoj oborony` dlya provedeniya avarijno-spasatel`ny`x rabot pri razrushenii zdaniy // *Texnologii grazhdanskoj bezopasnosti*. 2023. Vol. 20, No 4 (78). Pp. 16–25.

6. Ry`bakov A.V., Ivanov E.V., Petrenko P.P. et al. Zadacha obosnovaniya racional`ny`x parametrov opoveshheniya spasatelej pri provedenii avari-

jno-spasatel'ny'x rabot // *Texnologii grazhdanskoj bezopasnosti*. 2024. Vol. 21, No 3 (81). Pp. 101–106.

7. Kahn A.B. Topological sorting of large networks // *Communications of the ACM*. 1962. Vol. 5 (11). Pp. 558–562.

8. Kameneczkaya N.V., Medvedeva O.M., Golubchikova A.A. et al. Optimizaciya processov operativnogo reagirovaniya sil i sredstv MChS Rossii na chrezvy'chajny'e situacii s primeneniem metoda posledovatel'nogo analiza // *Prioritetny'e napravleniya innovacionnoj deyatel'nosti v promy'shlennosti: Sbornik nauchny'x statej po itogam VII mezhd. konf., Kazan', 30–31.07.2020. P. 1. Kazan': «KONVERT», 2020. Pp. 45–49.*

9. Sharipov G.A., Mazanik A.I., Ry'bakov A.V. Analiz problemnoj situacii primeneniya sil pri provedenii avarijno-spasatel'ny'x rabot v usloviyax razrusheniya zdaniy i sooruzhenij // *Texnologii grazhdanskoj bezopasnosti*. 2025. Vol. 22, No 3 (85). Pp. 45–50.

10. Zavorotny'j A.G., Kostrubiczkij A.A., Lomakin M.I. Model' ocenki e'ffektivnosti meropriyatij zashhity naseleniya v chrezvy'chajny'x situa-

ciyax texnogenno go xaraktera // *Grazhdanskaya oborona na strazhe mira i bezopasnosti: Materialy' VIII MNPK, posvyashhennoj Vsemirnomu dnyu grazhdanskoj oborony': in 5 p., Moskva, 01/03/2024. Moskva: Akademiya Gosudarstvennoj protivopozharnoj sluzhby', 2024. Pp. 175–181.*

11. Baxtiyarova O.N., Pticya I.V., Podzorova M.I. Primenenie simpleks-metoda dlya resheniya zadach linejnogo programmirovaniya v kurse disciplin «Issledovanie operacij» i «Metody' optimizacii» // *Modern European Researches*. 2023. Vol. 1, No 3. Pp. 5–16.

12. Samorokovskij A.F. Model' optimal'nogo raspredeleniya resursa operativny'm shtabom pri provedenii e'vakuacii v usloviyax vozniknoveniya chrezvy'chajnoj situacii // *Vestnik Voronezhskogo instituta MVD Rossii*. 2021. No 1. Pp. 122–130.

13. Parxomchik E'.A., Ponomarev A.I. Kompleksnaya metodika obosnovaniya racional'noj gruppirovki sil i sredstv, privlekaemoj dlya likvidacii chrezvy'chajnoj situacii v voennoe vremya // *Nauchny'e i obrazovatel'ny'e problemy' grazhdanskoj zashhity'.* 2019. No 2 (41). Pp. 61–68.