УДК 624.131:510.6

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НЕЧЕТКИХ КОГНИТИВНЫХ КАРТ ПРИ РАЗРАБОТКЕ РАСЧЕТНЫХ МОДЕЛЕЙ ОСНОВАНИЙ

Л.А. Строкова

Томский политехнический университет
E-mail: geyer@tpu.ru

Представлен когнитивный подход к построению расчетной модели оснований инженерных сооружений. Определены целевые факторы когнитивной карты, проведен анализ связанности и изучен процесс распространения возмущений на графе, что позволяет определить резервы повышения эффективности деятельности инженерно-изыскательских отделов проектных организаций. Рассмотрены проблемы, возникающие при оценке грунтов в качестве основания.

Ключевые слова:
Нечеткие когнитивные карты, принятие решения, расчетная модель основания.

Нормальная эксплуатация сооружений во многом определяется правильностью принятых решений, в том числе по соответствию принятой расчетной модели (РМ) реальному поведению грунта. Процесс создания расчетной модели основания слабо формализован и структурирован по причине неполных, нечетких знаний об объекте исследования. Например, среди неопределенностей можно назвать следующие.

1. Параметры расчетной модели, практически всегда являются величинами неточными. Часто эти параметры являются по существу случайными величинами и, принимая то или иное значение, мы оперируем с некоторой реализацией такой случайности. Например, параметры жесткости упругого основания могут иметь разброс значений порядка ±15...30 %, а в некоторых ситуациях возможны более существенные отклонения. Иногда значение параметра попросту неизвестно точно в силу ограниченности наших знаний [1].
2. Необходимо считаться с предысторией формирования напряженно-деформированного состояния основания, что часто трудноопределимо.
3. Поведение грунтов основания различается при длительных и кратковременных, статических и динамических нагрузках и др., а поиск решений с учетом всего множества значений неопределенных параметров является очень трудоемкой и дорогостоящей операцией. При варьировании не одного, а нескольких параметров объем перебора вариантов угрожающе возрастает.
4. Большинство критериев оценки поведения грунтов принадлежит к категории слабо формализуемых понятий, например, «категория сложности инженерно-геологических условий», «степень водонасыщения», «степень неоднородности гранулометрического состава» и тому подобное. Их измерение осуществляется с использованием вербальных (словесных, лингвистических) оценок типа «хорошая», «плохая», «средняя», «отличная», которые сложно учесть в общей оценке инженерно-геологических условий площадки.
5. В процессе создания модели расчетчик оперирует некими слабо формализуемыми правилами, типа «Если при удвоении напряжения вдвое увеличиваются деформации, то считать такой грунт линейно-деформируемым». Функционально выразить такие правила, тем более что их может быть не один десяток, в виде строгих математических структур практически невозможно.

При исследовании слабоструктурированных систем и ситуаций сегодня в ряде областей науки и информационных технологий активно формируется подход, который называют когнитивным подходом, или когнитивным анализом, или когнитивным моделированием. Когнитивный подход к поддержке принятия решений ориентирован на то, чтобы активизировать интеллектуальные процессы субъекта и помочь ему зафиксировать свое представление проблемной ситуации в виде формальной модели. В качестве такой модели обычно используется так называемая когнитивная карта ситуации, которая представляет известные субъекту основные законы и закономерности наблюдаемой ситуации в виде ориентированного знакового графа, в котором вершины графа – это факторы (концепты, значимые признаки, характеристики ситуации), а дуги между факторами – причинно-следственные связи между факторами [2].

В когнитивной модели выделяют два типа причинно-следственных связей: положительные и отрицательные. При положительной связи увеличение значения фактора-причины приводит к увеличению значения фактора-следствия, а при отрицательной связи увеличение значения фактора-причины приводит к уменьшению значения фактора-следствия.

Для оценки возможных путей повышения качества работ по составлению расчетной модели основания выполним структурный анализ ситуации. На основе анализа работ [2–8] для структурного анализа процесса разработки расчетной модели основания были выбраны нечеткие когнитивные карты, т. к. аналитическое описание либо статистическое

наблюдение зависимостей между входными и выходными параметрами затруднено.

В целом, построение нечеткой когнитивной карты можно представить в виде следующей последовательности шагов [7], определяющих:

1) список концептов, значимых для данной предметной области;
2) отношения причинности (влияния) между каждой парой концептов;
3) знак влияния (положительное или отрицательное) между каждой парой концептов, связанных отношением причинности;
4) силу влияния между каждой парой концептов, связанных отношением причинности;
5) начальное состояние концептов;
6) внешние влияния на концепты.

Обычно множество базисных факторов, причинно-следственные отношения между ними и соответствующие переменные определяются по результатам интервьюирования, экспертного опроса или анализа текстов, имеющих отношение к исследуемой ситуации (информационно-аналитической базы). Основу информационно-аналитической базы данного исследования составили публикации ведущих российских и зарубежных агентств и специалистов в области геотехники.

На основании анализа ситуации отобрано 8 факторов, наиболее значимых в процессе разработки расчетной модели основания. При этом выделены внутренние и внешние факторы, характеризующие разные стороны исследуемого процесса (рис. 1, табл. 1).

Рис. 1. *Взаимоотношение внешних (темный тетраэдр) и внутренних (светлый тетраэдр) факторов, значимых при разработке РМ*

Для описания факторов использованы понятия нечеткой и лингвистической переменных. Важным моментом является то, что все факторы и, соответственно, их изменения имеют количественное выражение. Это количественное выражение может быть либо объективно измеряемым, либо иметь лингвистическое значение, имеющее числовую интерпретацию.

Таблица 1. *Базисные факторы, влияющие на разработку расчетной модели*

№	Наименование фактора (переменной)	Значения	Ед. изм.	Интервал измерения
1	Стоимость проекта (x_1)	Малая, средняя, высокая, очень высокая	Усл. ед.	[0, 10^7]
2	Сложность инженерного сооружения (ИС) (x_2)	Повышенная, нормальная, пониженная (I, II, III уровень ответственности по ГОСТ 27751-88)	Балл	[1, 2, 3]
3	Время на разработку модели (x_3)	Малое, среднее, большое	Балл	[0, 1]
4	Квалификация персонала (x_4)	Низкая, средняя, хорошая, высокая	Балл	[0, 1]
5	Материально-техническая база (МТБ) (x_5)	Плохая, средняя, хорошая, очень хорошая	Усл. ед.	[0, 10^6]
6	Сложность инженерно-геологических условий (ИГУ) (x_6)	Простая, средней сложности сложная (1, 2, 3 категория сложности по СП 11-105-97)	Балл	[1, 2, 3]
7	Состояние системы оценки качества, экспертизы (x_7)	Низкое, среднее, высокое	Балл	[0, 1]
8	Риск (x_8)	Допускаемый, предельно-допускаемый, недопустимый	Усл. ед./чел./год	[0, 10^7]

Заказчики (получатели конечных продуктов, произведенных в процессе проектирования) определяют правила, требования, условия и бюджет на функционирование процесса. Их интересы состоят в соответствии проекта стандартам, целям и задачам, а также в минимизации риска и стоимости. Фирма, осуществляющая проектирование, обеспечивает функционирование процесса необходимыми ресурсами: зданиями и сооружениями, оборудованием и машинами, а также трудом.

Рассмотрим лингвистические переменные.

«*Стоимость процесса разработки РМ*». Показатели стоимости процесса связаны с расходованием ресурсов в рамках процесса разработки РМ. Затраты состоят из затрат на изыскания, а также таких как труд, машинное время, накладные расходы, интегрированные в процесс.

«*Время процесса разработки модели*». Показатели времени связаны с производственным циклом проектной организации, пропускной способностью и чувствительностью, т. е. степенью его подверженности влиянию других факторов. Показатели времени влияют на стоимость процесса проектирования: уменьшение времени выполнения процесса означает, как правило, снижение его стоимости. Многие

ведущие организации фокусируются в большей степени на снижении времени деловых процессов, а не на их стоимости. В результате они сокращают длительность производственного цикла, что автоматически приводит к снижению затрат [9].

Показатели времени процесса подразделяются на две категории:

1. Операционное время – время, затрачиваемое на определение проблем, решение проблем путем преобразования данных, поступающих на вход процесса, в конечные продукты на выходе процесса. Оно связано с прямым использованием ресурсов или факторов производства по обработке данных.
2. Время, связанное с качеством – время, которое включает проверку, исправление ошибок, поддержку уровня качества и обучение.

Нехватка времени может наложить свои коррективы на качество принимаемых решений, выбор правильной стратегии, а также психологический климат в коллективе предприятия.

«*Материально-техническая база*». Понятие «материально-техническая база» включает следующие признаки: состав и состояние оборудования для лабораторных и полевых испытаний грунтов, уровень его автоматизации, принятая система поверок оборудования, наличие необходимого программного обеспечения.

«*Персонал*». Квалификация персонала является одним из основных факторов разработки качественной расчетной модели. К характеристикам квалификации персонала относятся: образование, опыт работы, гибкость мышления при постановке новых задач, мотивация трудовой деятельности.

«*Сложность инженерно-геологических условий*». Определяется по положению СП 11-105-97, относится к внутренним факторам, таким, как опыт персонала, материально-техническая база отдела изысканий. От этой переменной зависят затраты на возведение фундамента, проведение предупредительных мероприятий по недопущению негативных процессов.

«*Сложность инженерного сооружения*». Определяется по положению ГОСТ 27751-88, относится к внешним факторам, т. к. полностью зависит от пожелания заказчика.

«*Качество. Экспертиза*». Система оценки качества имеет двойственную природу, с одной стороны, она определяется законодательными актами, нормами, являющимися внешними факторами в процессе разработки РМ, с другой стороны, стремление к созданию качественного продукта является одним из мотивов трудовой деятельности, как отдельного сотрудника, так и предприятия в целом. Показатели соответствия стандартам устанавливают соответствие качества выпускаемого продукта существующим нормам. Эти показатели позволяют измерить степень соответствия продукта потребностям заказчика; количество возвратов; приверженность процедурам; результаты тестирования; эффективность бюджета; согласованность с законодательными и нормативными актами; а также характеристики, связанные с безопасностью, защищенностью и влиянием на здоровье.

«*Риск*». Понятие риска сочетает в себе как оценку вероятности неблагоприятного события, так и оценку уровня последствий от его реализации (ущерб, убытки, потери и т. п.). Иными словами, риск есть вероятностная оценка уровня потерь (финансовых и человеческих) за определенный промежуток времени. Составляющими риска являются неопределенность информации о параметрах среды, об условиях реализации проекта, неправильные решения персонала, неточность измерений, действие системы качества и экспертизы и многие другие. Принятие решения в условиях риска является весьма сложной процедурой, однако во многих случаях, когда надежные вероятностные описания отсутствуют, либо возможные убытки могут быть оценены только приближенно, наиболее разумным вариантом является минимаксный подход. Этот подход предполагает принимать вероятность наступления удачного исхода минимальной, а возможные потери оценивать по максимуму [1, 10].

Для установления причинно-следственных отношений определена шкала для оценки характера (положительный или отрицательный) и силы связи между базисными факторами. Значения соответствующих переменных задаются в лингвистической шкале [8]; каждому из них ставится в соответствие число в интервале от минус – до плюс единицы (табл. 2).

Таблица 2. *Оценка связи между базисными факторами*

Лингвистическое описание	Численное значение
Не влияет	0
Очень слабо усиливает (ослабляет)	0,1; 0,2 (−0,1; −0,2)
Слабо усиливает (ослабляет)	0,3; 0,4 (−0,3; −0,4)
Умеренно усиливает (ослабляет)	0,5; 0,6 (−0,5; −0,6)
Сильно усиливает (ослабляет)	0,7; 0,8 (−0,7; −0,8)
Очень сильно усиливает (ослабляет)	0,9; 1,0 (−0,9; −1,0)

После структуризации информации выполнено построение когнитивной карты разработки модели (рис. 2).

Когнитивная карта представляет собой взвешенный ориентированный граф $G=(X,A)$, в котором X – множество вершин (базисных факторов), A – множество дуг, отражающих непосредственные влияния факторов друг на друга. Каждая дуга, связывающая фактор x_i с фактором x_j, имеет вес a_{ij}, отражающий характер и силу влияния фактора x_i на фактор x_j. Если a_{ij} – положительная величина, то при изменении значения x_i значение x_j изменяется в том же направлении, если a_{ij} – отрицательная, то при изменении значения x_i значение x_j изменяется в противоположном направлении. Модуль величины a_{ij} характеризует силу влияния.

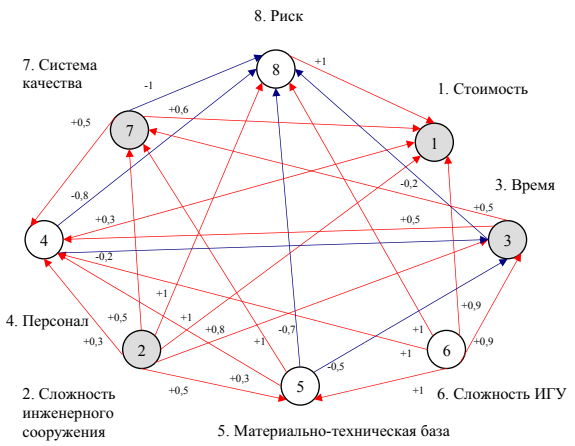

Рис. 2. *Нечеткая когнитивная карта разработки модели основания*

С графом G ассоциируется матрица смежности A_g (табл. 3). Элемент a_{ij} матрицы A_g, стоящий на пересечении i-ой строки и j-го столбца, характеризует влияние фактора x_i на фактор x_j.

Таблица 3. *Матрица смежности орграфа*

	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8
x_1	0	0	0	0	0	0	0	0
x_2	1	0	0,8	0,3	0,5	0	0,5	1
x_3	0	0	0	0	0	0	0,5	−0,2
x_4	0,3	0	−0,2	0	0	0	0	−0,8
x_5	0	0	−0,5	0,3	0	0	1	−0,7
x_6	1	0	0,9	0,9	0,9	0	0,5	1
x_7	0,6	0	0	0,5	0,6	0	0	−1
x_8	1	0	0	0	0	0	0	0

На этом же этапе из множества базисных факторов ситуации задаются подмножества целевых и управляющих факторов и вектор начальных тенденций базисных факторов. В качестве управляющих факторов выбираются факторы, относящиеся к объекту управления или к внешней среде, на которые субъект управления имеет возможность воздействовать. В качестве целевых факторов выбираются факторы в наибольшей степени характеризующие состояние объекта управления и его цели.

На следующем этапе к построенной карте применяются методы аналитической обработки, ориентированные на исследование структуры системы и получение прогнозов ее поведения при различных управляющих воздействиях [7].

При анализе построенной схемы возможны постановки двух тесно взаимосвязанных задач: прямая – как будет развиваться ситуация при таких внешних воздействиях; обратная – какие воздействия нам выбрать, чтобы получить требуемое.

Для анализа матрицы выделим целевые факторы – те факторы, изменения которых в нужную сторону мы хотим добиться. Затем выделим рычаги воздействия – те факторы, которые мы можем в определенных пределах менять. Проанализируем связи рычагов воздействия и целевых факторов – как вообще мы можем управлять ситуацией.

Наиболее распространенным является интерпретация матрицы как преобразования процентных изменений причин в процентные изменения следствий. К примеру, есть на нашей карте связь А→Б с весом +0,8 – это значит, что если величина фактора А возрастет на 10 %, то величина фактора Б возрастет (знак «+») на 8 % (=10 %*0,8). Это позволяет рассматривать на одной модели факторы, не заботясь о единицах измерения [11]. Разумеется, такой подход не слишком точен, но нас количественные оценки интересуют для качественных выводов – просто понять, какой рычаг надо двигать вверх, какой вниз. Или оценить, насколько конечный результат зависит от этого рычага, и насколько от другого.

В качестве целевого фактора выбрана переменная «риск», а в качестве управляющих факторов приняты переменные «квалификация персонала», «материально-техническая база», «действие системы менеджмента качества», «сложность инженерного сооружения», «время».

К примеру, если уменьшить риск на 10 %, то необходимо повысить квалификацию персонала на 8 %, проектировать менее ответственные сооружения на 10 %, время проектирования увеличить на 2 %, улучшить материально-техническую база на 7 %, уменьшить на 10 % сложность грунтовых условий (выполнять изыскания для объектов с простыми грунтовыми условиями, затем при накоплении опыта, можно увеличить сложность на 5 %. Результаты расчета 18 шагов этой модели в MS Excel в виде графика изображены на рис. 3.

На вопрос, как изменится ситуация, если уменьшить на 10 % время разработки модели, расчет показал следующие результаты: вначале, при дефиците времени, необходимо выполнять изыскания для несложных объектов (–8 %) в простых инженерно-геологических условиях (–9 %), с увеличением квалификации персонала на 2 % и материально-технической базы на 5 %, что позволит уже на 4 шаге браться за более сложные объекты в сложных грунтовых условиях (рис. 4).

На вопрос, как изменится ситуация, если повысить на 10 % квалификацию сотрудников, расчет показал только позитивные результаты (рис. 5): можно выполнять проекты повышенной сложности (на 3 %) в сложных инженерно-геологических условиях на 12 %, соответственно потребуется обновление материально-технической базы на 3 %.

На вопрос, как изменится ситуация, если повысить на 10 % действие системы менеджмента качества, расчет показал следующие результаты (рис. 6): можно выполнять проекты повышенной сложности (на 15 %) в сложных инженерно-геологических условиях на 18 %, соответственно потребуется обновление материально-технической базы на 7 % и увеличение времени на 5 %, квалификация персонала в малой степени снизится за счет более строгой регламентации деятельности.

Настоящая когнитивная модель, отражая, главным образом, качественные тенденции развития

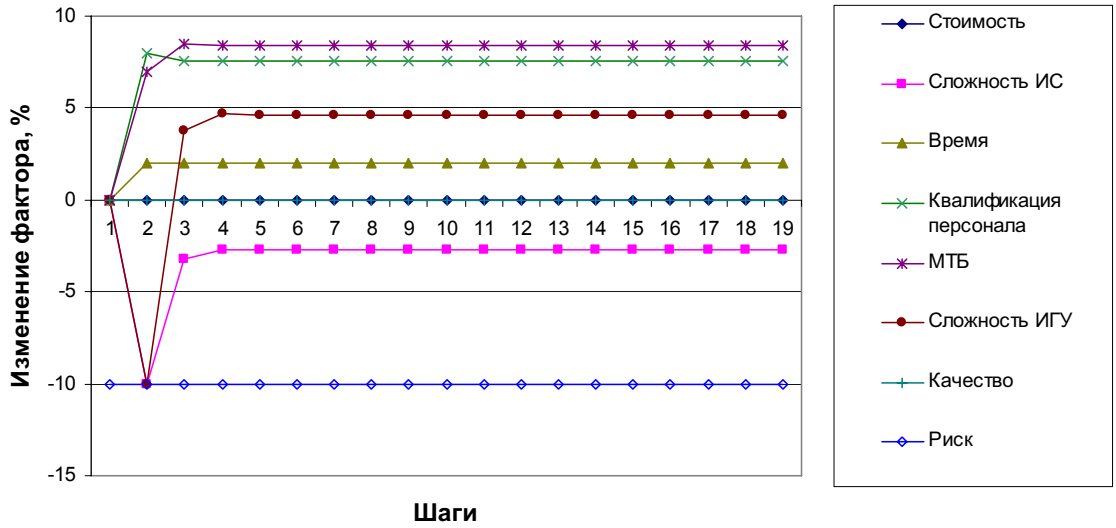

Рис. 3. *Результаты расчета сценария снижения риска*

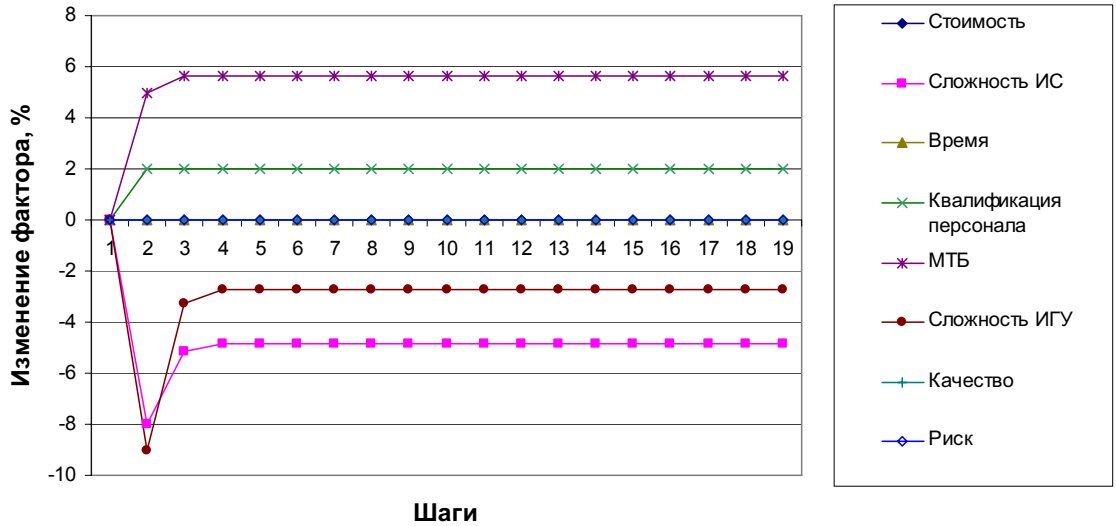

Рис. 4. *Результаты расчета сценария дефицита времени*

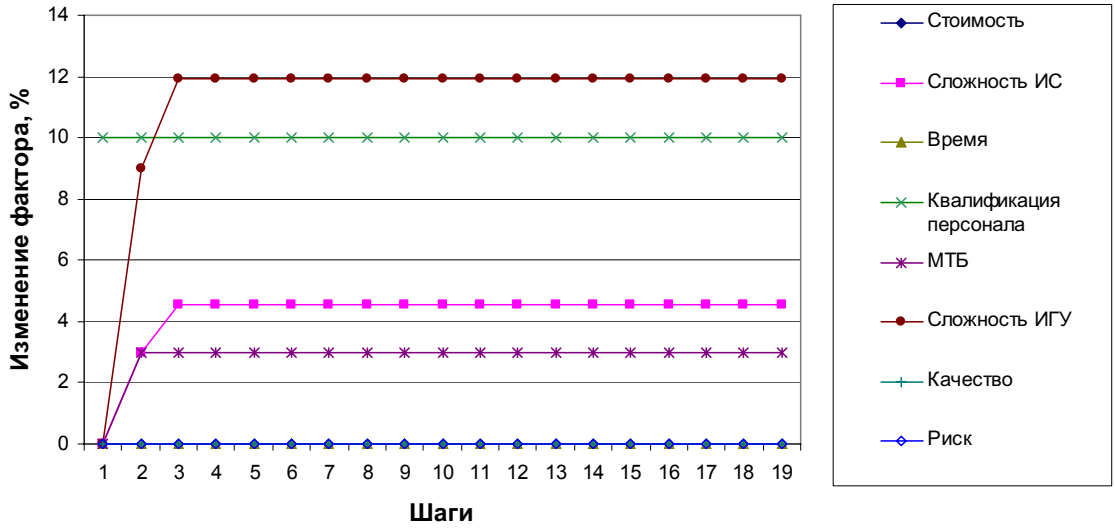

Рис. 5. *Результаты расчета сценария повышения квалификации*

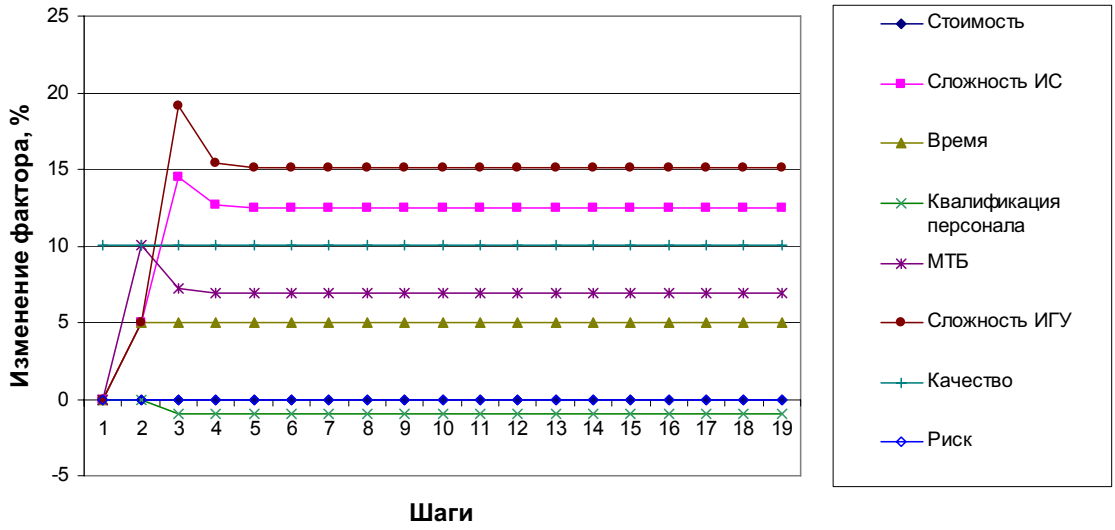

Рис. 6. *Результаты расчета сценария повышения действия системы менеджмента качества*

ситуации, является одним из средств оптимизации работ при проектировании сооружений.

Выводы

1. Применение когнитивных технологий для решения проблем, связанных с составлением расчетных схем оснований, представляется перспективным, поскольку разработка когнитивных карт и последующее моделирование на их основе различных сценариев изменения ситуации позволяет не только прогнозировать возможность возникновения некоторой проблемы с появлением нового объекта изысканий (например, усложнение грунтовых условий строительства, сокращение сроков проектирования и др.), но и промоделировать вероятность ее развития, чтобы предпринять комплекс мер (технических, административных и др.) для эффективного функционирования инженерно-изыскательского отдела проектной организации.
2. Структуризация знаний о процессе разработки расчетной модели способствует коренному улучшению важнейших показателей деятельности организации: затрат, качества услуг и скорости их выполнения.
3. Установлено, что ключевым фактором, которым возможно действенное управление при любых сценариях, является «персонал». Повышение квалификации сотрудников благотворно скажется на разработке качественных расчетных моделей. Первым шагом в реализации этого положения должно стать структурирование информации об определяющих уравнениях грунтов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Перельмутер А.В., Сливкер В.И. Расчетные модели сооружений и возможность их анализа. – Киев: Сталь, 2002. – 600 с.
2. Kosko B. Fuzzy cognitive maps // Intern. Journal of Man-Machine Studies. – 1986. – V. 1. – P. 65–75.
3. Structure of Decision. The Cognitive Maps of Political Elites / Ed. by R. Axelrod. – Princeton: Princeton University Press, 1976. – 405 p.
4. Konar A. Artificial intelligence and soft computing: behavioral and cognitive modeling of the human brain. – CRC Press LLC, 2000. – 788 p.
5. Силов В.Б. Принятие стратегических решений в нечеткой обстановке. – М.: ИНПРО-РЕС, 1995. – 228 с.
6. Кулинич А.А. Когнитивная система поддержки принятия решений «Канва» // Программные продукты и системы. – 2002. – № 3. – С. 25–28. [Электронный ресурс]. – режим доступа: www.raai.org/about/persons/kulinich/pages/kanva2003.doc. – 12.03.2008.
7. Лагерев Д.Г. Автоматизация разработки управленческих решений в социально-экономических системах на основе применения нечетких когнитивных моделей: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Брянск, 2007. – 20 с.
8. Макаренко Д.И. Модели и методы стратегического управления оборонно-промышленным комплексом: Автореф. дис. ... канд. экон. наук. – М., 2006. – 24 с.
9. Курьян А. Система измерения показателей эффективности // Ресурсы. – Минск, 1997. – 7 с. [Электронный ресурс]. – режим доступа: http://www.trizminsk.org/r/430003.htm. – 12.03.2008.
10. Einstein H.H., Sousa R. Warning Systems for Natural Threats // Proc: ECI Conference on Geohazards. – Lillehammer, Norway, 2006. – 39 p.
11. Василенко Т.Г. Когнитивные карты // Образовательный портал ООО «Организация Времени. [Электронный ресурс]. – режим доступа: http://www.improvement.ru/zametki/cognitive/. – 12.03.2008.
12. Carson J.S. Model verification and validation // Proc. of the 2002 Winter Simulation Conference. – 2002. – P. 52–58.
13. Люггер Дж.Ф. Искусственный интеллект: стратегии и методы решения сложных проблем. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2003. – 864 с.

Поступила 25.11.2008 г.