

А. Л. ТЮТКИН (ДИИТ)

КОНЦЕПЦИЯ СТАТУСНОСТИ В КОМПЛЕКСНОМ АНАЛИЗЕ ПРОЧНОСТИ КОНСТРУКЦИЙ ПОДЗЕМНЫХ СООРУЖЕНИЙ

В статті наведено теоретичні положення концепції визначення статусу конструкцій підземних споруд для проведення комплексного аналізу.

В статье приведены теоретические положения концепции определения статуса конструкций подземных сооружений для проведения комплексного анализа.

In the article the theoretical positions of conception of status determination of constructions of underground structures for conducting the complex analysis are presented.

Развитие методов исследования основных параметров сложных систем, к которым относятся и конструкции подземных сооружений, практически всегда концептуально опиралось на определение напряженно-деформированного состояния (НДС). К основным параметрам системы можно отнести те глобальные понятия, которые эту систему описывают, как целостный объект, подчиняющийся целесообразным условиям существования и применения, т.е. – прочность, устойчивость и долговечность. Существующие методы определения этих параметров являются методами механики сплошной среды. Следует отметить, что методы механики сплошной среды в применении к реальным объектам, которые отличаются значительной сложностью в математическом описании, следуют правилам индукции, т.е. рассмотрение метода начинается с общих понятий и ведет к частным случаям. Индуктивный подход присущ значительно разработанным теориям, которые прошли этап дедукции – накопления и описания наблюдений и выработки общих гипотез, на которых базируется теория.

Исследование прочности и устойчивости конструкций подземных сооружений также основывается на определении НДС системы, которое анализируется вместе с определенными критериями этих параметров. Но особенность исследования НДС системы «подземное сооружение – окружающий массив» (или короче «крепь – массив») отмечена тем, что значительные размеры этих сооружений, присущая им нерегулярность конструкций, структурные особенности (скачкообразное изменение жесткостей, контактные условия, неравномерное распределение параметров) приводит к тому, что анализ НДС конструкции в целом затруднен и, поэтому, разделяется на ряд аналитиче-

ских действий в пределах его частей. Данная операция разделения, несомненно, целесообразна, а в некоторых случаях является единственно возможной, т.к. дает возможность более обстоятельного исследования системы и получения репрезентативных данных, но вместе с тем теряется некоторая комплексность подхода к исследованию, т.к. анализ частей системы в общем случае не позволяет сделать общие выводы о ее состоянии и поведении. Это следует из того факта, что анализ НДС исследуемой системы или ее частей заключается в процессе обычного сравнения наличного напряженного и/или деформированного состояний с критериями общих параметров прочности и устойчивости, хотя в случаях более комплексного анализа влияния одного или многих факторов, вносящих в систему некоторые изменения, требуется исследовать их влияние, что заключается в его многофакторном сравнении, которое является довольно сложным процессом. Поэтому автором предлагается для исследования прочности и устойчивости конструкций применить концепцию статусности НДС для комплексного исследования системы или ее частей.

Для определения статусности НДС введем в его комплексный анализ понятие «статус» (St). Под статусом будем понимать изменение НДС вследствие изменения параметров системы в n раз, причем начальным статусом ($St = 1$) будем называть статус НДС системы в стационарном состоянии (например, в состоянии равновесия). Ранее автором при изложении данной концепции вместо термина «статус» применялся термин «ранг» [1], однако после обсуждения рядом специалистов в области математической статистики данный термин изменен на термин «статус» в силу того, что термин «ранг» имеет устоявшуюся интерпретацию [2].

Таким образом, повышение или понижение статуса НДС вследствие изменения параметров системы количественно определяет влияние таких изменений. Сложность системы, отличающейся большими размерами и специфическими особенностями, состоит в том, что изменение параметров в локальных областях приводит к изменению статуса только в них. Изменение параметров системы значительных размеров постепенно затухают по координате и, таким образом, статус постепенно принимает значение равное единице. Соответственно статусом НДС исследуемой системы будет набор статусов от 1 до n . Здесь также можно отметить, что $St < 1$, что обусловлено случаями положительных изменений в системе, например оптимизации ее параметров. Две одинаковые системы с незначительным изменением параметров и $St = 1$ идентичны друг другу.

Практически статус НДС системы определяется из сравнения напряженного и деформированного состояний исходной системы и той же системы с измененными параметрами:

$$St(\varepsilon) = \frac{\sigma_k}{\sigma_n}; \quad (1)$$

$$St(\varepsilon) = \frac{\varepsilon_k}{\varepsilon_n}, \quad (2)$$

где $St(\sigma)$ и $St(\varepsilon)$ – соответственно статусы напряженного и деформированного состояний; σ_k и ε_k – соответственно напряжения и перемещения системы с измененными параметрами; σ_n и ε_n – соответственно напряжения и перемещения исходной системы.

Таким образом, для практического определения статуса НДС системы и системы с измененными параметрами следует определить их НДС и провести их сравнение. Статус, полученный в его результате, дает возможность количественно оценить во сколько раз изменится НДС системы (или подсистем) из-за внесения в нее изменений. Следует добавить, что статус имеет дробное значение, т.к. изменение только в частном случае будет выражаться целым числом.

Также следует определить, что под стационарным состоянием системы следует выбирать такое состояние, которое может считаться явно определенным и равновесным, а сравниваемые с им состояния системы с измененными параметрами являлись результатом суперпозиции стационарного первичного состояния с влиянием привнесенных изменений. Например, в ис-

следовании прочности и устойчивости конструкций подземных сооружений, таким стационарным состоянием может быть состояние системы «крепление – массив» под действием собственного веса [3], а системы с измененными параметрами будут характеризоваться и действием собственного веса и влиянием на НДС привнесенных изменений.

Комплексный анализ системы «крепь – массив» с использованием процесса присвоения статуса может также быть проведен как анализ изменения подсистем и представлен как количественное изменение напряжений и деформаций вследствие изменений существенных параметров системы с помощью статуса (1)-(2), но, введя еще один показатель, этот анализ можно несколько расширить. Таким показателем является нормированный статус $|St|$, который представляет собой количественное изменение НДС системы (или подсистем) с изменением параметров относительно критериев прочности или устойчивости:

$$|St|(\sigma) = \frac{\sigma_k}{|\sigma|}; \quad (3)$$

$$|St|(\varepsilon) = \frac{\varepsilon_k}{|\varepsilon|}, \quad (4)$$

где $|St|(\sigma)$ и $|St|(\varepsilon)$ – соответственно нормированные статусы напряженного и деформированного состояний; σ_k и ε_k – соответственно напряжения и перемещения системы с измененными параметрами; $|\sigma|$ и $|\varepsilon|$ – соответственно нормированные значения напряжений и перемещений.

Следует отметить, что нормированный статус, в отличие от статуса системы (подсистемы), является дифференциальной характеристикой, т.к. он имеет смысл для каких-то локальных областей, изменения которых не столь значительны. Таким образом, понятие нормированного статуса несколько похоже на понятие «коэффициент запаса», но отличается от него тем, что значение статуса может быть меньше единицы, свидетельствуя о негативном влиянии изменений на НДС системы, а также тем, что статус может быть как интегральной (статус системы или подсистем), так и дифференциальной (нормированный статус точек системы) характеристикой. Также понятие статуса похоже на понятия теории риска, применяемой для оценки влияния изменений на НДС конструкции [4], но отличие состоит в том, что

теория риска основана на применении вероятностного подхода, а аналитические построения процесса определения статуса – на положениях детерминистических нестохастических процессов. Поэтому теория риска более применима для прогнозирования влияния технологических ошибок и наличия дефектов в конструкции [5], а процесс определения статуса можно использовать в прогнозировании изменения НДС вследствие изменений явного характера – разрушения частей конструкции, исследования комплексов нагрузок, влияния геометрических размеров и процесса оптимизации и так далее.

Т.к. статус является количественной характеристикой только НДС и не дает возможности анализировать или классифицировать причины, вызывающие его изменение, введем в комплексный анализ прочности и устойчивости конструкций подземных сооружений термин «вес» (Wt), который будет качественно описывать изменения в системе. Качественный характер понятия веса заключается в том, что классифицировать изменения в такой сложной системе, как подземное сооружение, практически невозможно, т.к. их характер существенно различается, например, технологические особенности установки элементов, изменение коэффициента фильтрации массива, изменение геометрических размеров конструкции. Несомненно, эти явления ведут к изменению НДС, но их сущностный характер настолько различен, что создание классификации всех изменений потребует наличия огромного числа классов, отделов и подотделов, но не даст возможности комплексно проанализировать их влияние. Поэтому под весом будем понимать степень изменения НДС системы вследствие флуктуации параметра, и автором предложена первоначальная классификация весов, которая, конечно же, не является полной в силу своей первичности и несколько приблизительного характера распределения весов.

1. $Wt = 1$ – незначительные локальные изменения, мало влияющие на систему в целом (относительно небольшие геометрические изменения конструкции, локальные тепловые явления, незначительные изменения свойств системы).

2. $Wt = 2$ – значительные локальные изменения, слабо влияющие на систему в целом, но значительно влияющие на некоторые подсистемы (наличие слабой неоднородности массива, значительные геометрические изменения конструкции, тепловые явления в большей части системы).

3. $Wt = 3$ – незначительные глобальные изменения, влияющие как на подсистемы, так и на систему в целом (неоднородность всех частей системы, тепловые явления во всей системе, некатастрофические изменения геометрических размеров системы).

4. $Wt = 4$ – значительные глобальные изменения, значительно влияющие на систему в целом (нарушение частей системы, катастрофические тепловые явления, взрывы, катастрофические изменения геометрии системы).

Несомненно, представленная классификация изменений на основе веса, только разрабатывается, но полезность ее применения очевидна, т.к. уже исследованные изменения в системе «крепь – массив» дают возможность сделать вывод об их распределении по степени влияния на систему [6 – 8], т.е. по их весу.

Используя комплексный подход к НДС конструкций подземных сооружений, можно более четко обозначить вышеприведенную классификацию на основе веса, используя процесс определения статуса НДС. Практически это можно сделать, сравнивая статусы системы-исходника без изменений (или ее подсистем) и системы-вариации, в которой изменение классифицировано с помощью веса. Исследовав достаточное количество систем-вариаций с присвоенными им весами изменений и получив статусы НДС, можно будет скорректировать авторскую классификацию весов путем добавления в каждый класс веса границ статусов, то есть, например, у изменений с $Wt = 1$ будут известны значения статусов, определяющий данный вес. Таким образом, качественная характеристика веса приобретет количественное выражение и даст возможность более строгой классификации флуктуаций параметров, вносящих изменения в НДС исследуемой системы. Следует также отметить, что современные расчетные комплексы (Plaxis, SCAD, Lira) еще не приспособлены даже к определению обычных коэффициентов запаса, хотя наиболее динамично развивающиеся из них (MSC/Nastran, ANSYS) могли бы реализовать процедуру определения статуса путем сравнения файлов результатов с построением изолиний и изополей статусов.

Проиллюстрируем вышеизложенный материал несколькими примерами. Проведем определение статуса двух систем и их подсистем с измененными параметрами, в качестве исходника используется станция метрополитена мелкого заложения [9], расчетная схема (рис. 1, а) представляет собой часть реальной колонной станции мелкого заложения Киевского метро-

политена.

Параметры конечно-элементной модели исходной станции: узлов – 19476, КЭ – 15 721; деформационные характеристики модели: окружающий массив – глина, модуль упругости $E = 59$ МПа, коэффициент Пуассона $\mu = 0,35$, плотность $\gamma = 2,0$ т/м³; конструкция – железобетон, приведенный модуль упругости $E =$

$= 370$ МПа, приведенный коэффициент Пуассона $\mu = 0,1$, плотность $\gamma = 2,5$ т/м³. Глубина заложения станции – 10 м. В расчетах применялось только загрузке собственным весом.

Размеры конструкции станции взяты из проектной документации (рис. 1, б).

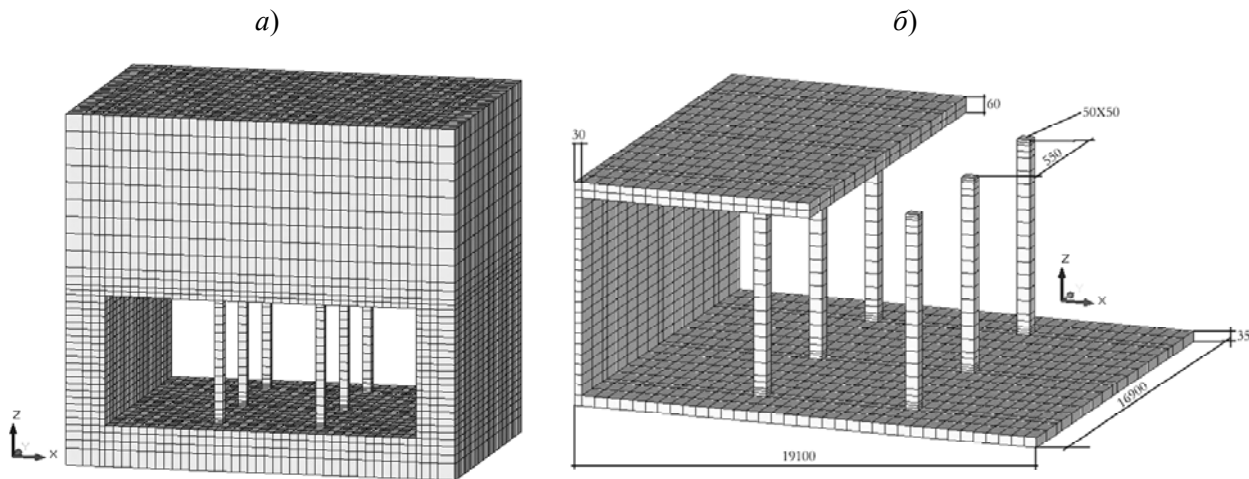


Рис. 1. Расчетная схема колонной станции мелко заложения

В качестве систем-вариаций разработаны модели исходной станции с измененными геометрическими параметрами:

– модель № 1 – в качестве изменения принята неправильная постановка одной колонны

(рис. 2, а), вес изменения $Wt = 1...2$;

– модель № 2 – в качестве изменения принято отсутствие одной колонны (рис. 2, б), вес изменения $Wt = 2...3$.

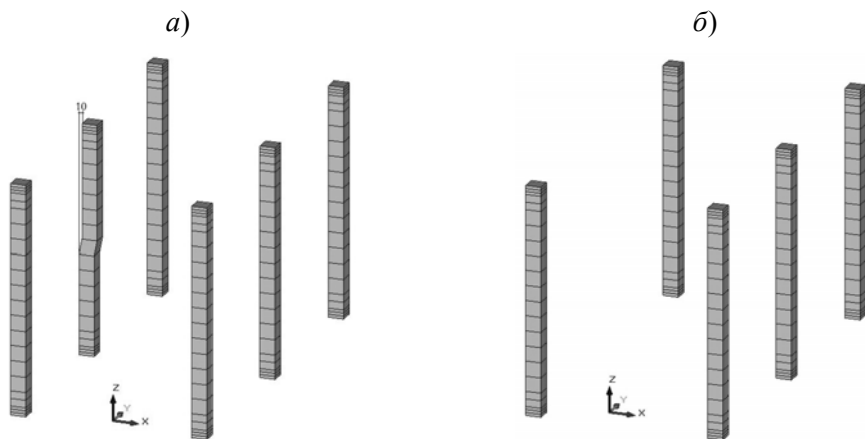


Рис. 2. Фрагмент моделей систем-вариаций: а) модель № 1; б) модель № 2

После расчетов по полученным результатам (рис. 3 – 4) проведен процесс определения статуса системы и ее подсистем. В качестве подсистем системы «крепь – массив» S выбраны следующие: S_1 – окружающий массив; S_2 – обделка станции без системы колонн; S_3 – система колонн. Процесс определения статуса проведен только для параметров НДС, которые изменялись значительно, а именно для переме-

щений по оси Z и для напряжений по оси Z . Статус для подсистемы вычислялся с помощью авторского приема суммирования колонки результатов, который заключается в суммировании первого столбца в колонке результатов для двух систем и дальнейшем их сравнении. Такой прием является адекватным процессу определения статуса, т.к. в колонке результатов даны минимальное и максимальное значение параметра, а все остальные значения между ними

располагаются с постоянным шагом. Таким образом, колонки результатов, полученные в результате расчета двух моделей, прямо свиде-

тельствуют об изменении НДС системы, не отображая характера изменений, но выражая его количественно.

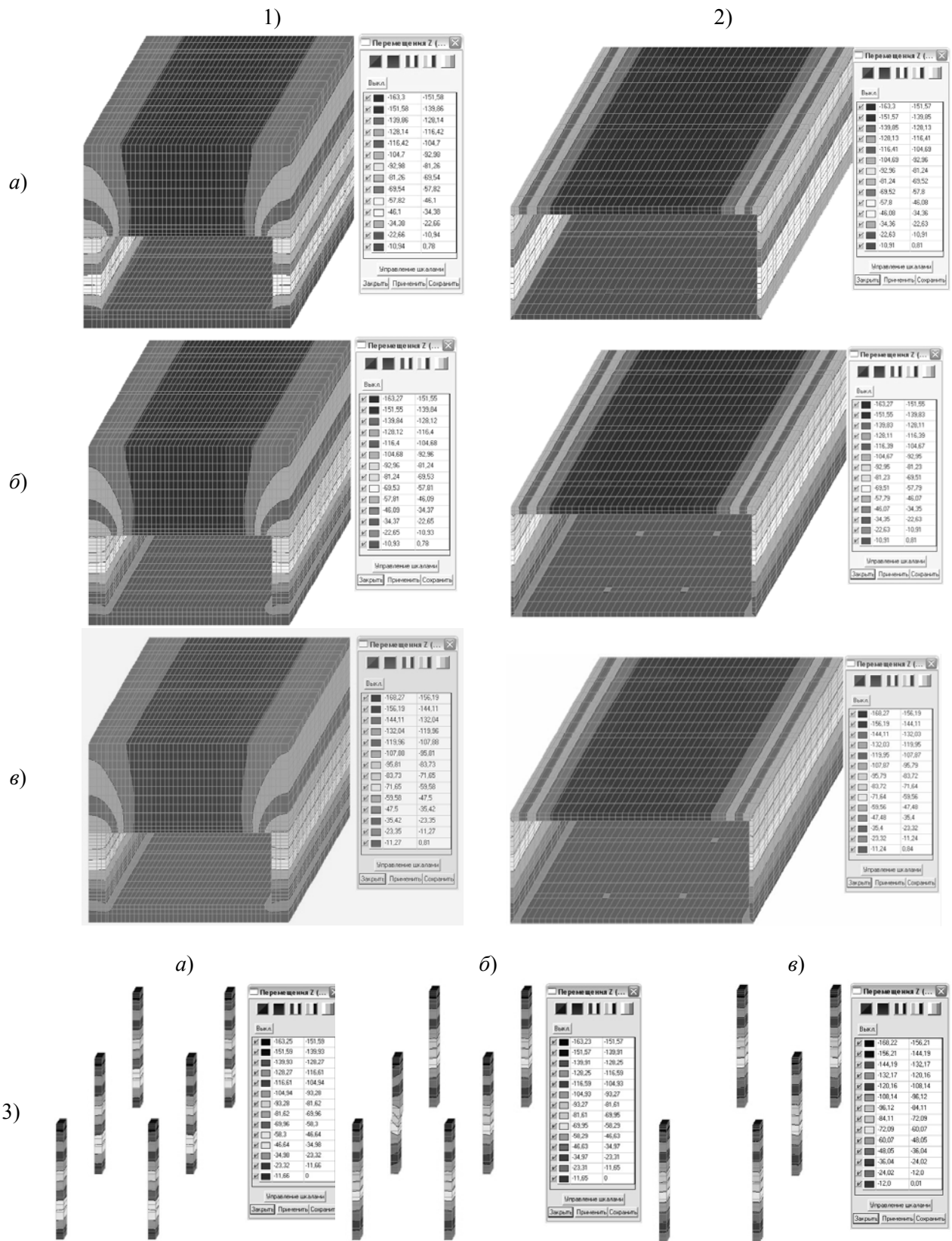


Рис. 3. Перемещения по оси Z в подсистемах: 1) S_1 ; 2) S_2 ; 3) S_3
 а) исходная система; б) модель № 1; в) модель № 2

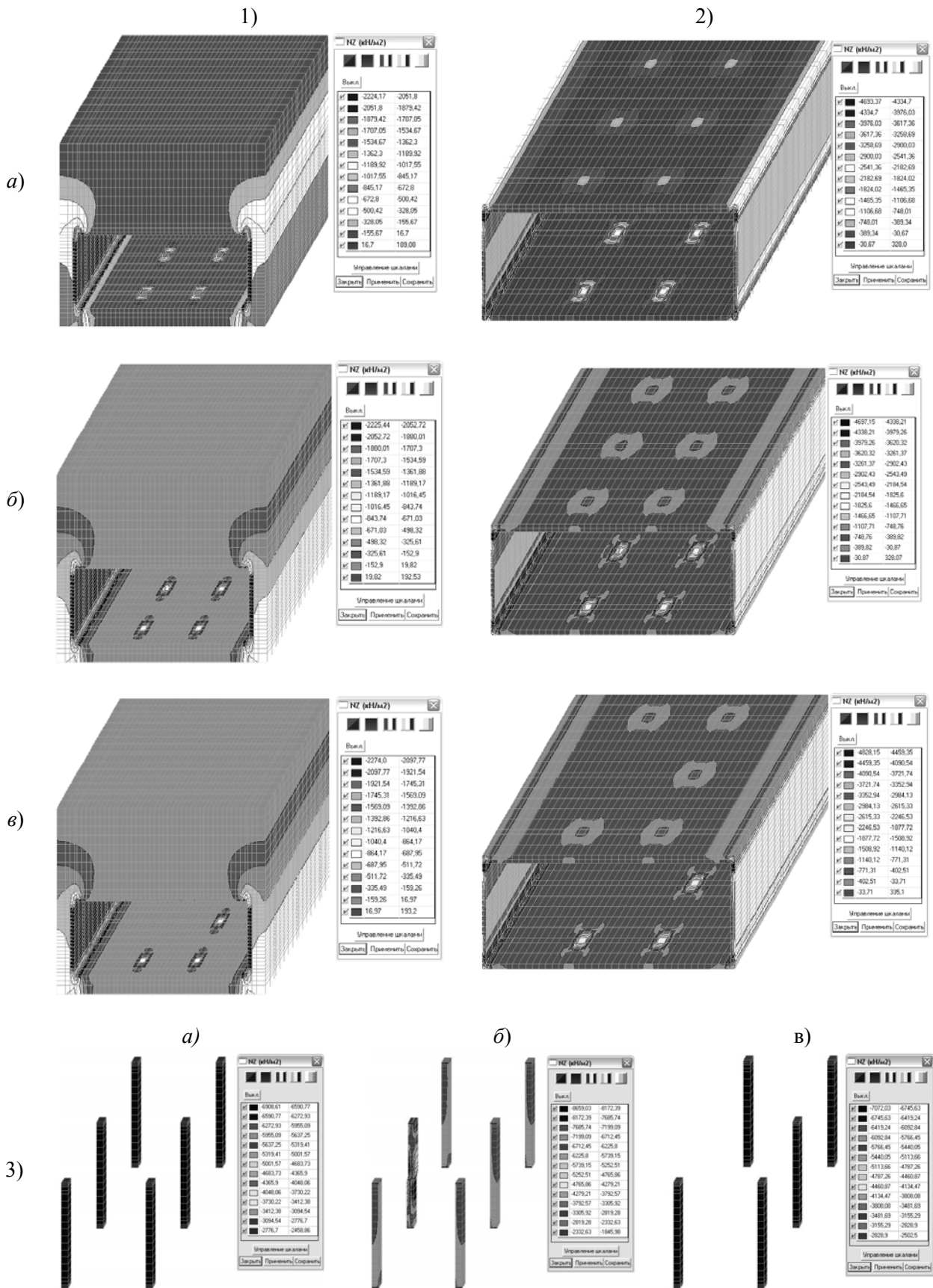


Рис. 4. Перемещения по оси Z в подсистемах: 1) S_1 ; 2) S_2 ; 3) S_3
 а) исходная система; б) модель № 1; в) модель № 2

Соответственно статус находится по следующим формулам:

$$St(\sigma) = \frac{\sum \sigma_k}{\sum \sigma_n}; \quad (5)$$

$$St(\varepsilon) = \frac{\sum \varepsilon_k}{\sum \varepsilon_n}, \quad (6)$$

где $St(\sigma)$ и $St(\varepsilon)$ – соответственно статусы напряженного и деформированного состояний; $\sum \sigma_k$ и $\sum \varepsilon_k$ – соответственно сумма напряжений и перемещений системы с измененными параметрами, найденные из колонки результатов; $\sum \sigma_n$ и $\sum \varepsilon_n$ – соответственно сумма напряжений и перемещений исходной системы, найденные из колонки результатов. Это еще раз показывает характер процесса определения статуса, как процесса, в результате которого получается количественная характеристика изменения вследствие флуктуаций параметров системы, выражающихся с помощью веса. В процессе определения статуса получены следующие статусы подсистем:

1. Статус напряженного состояния $St(\sigma)$.

а) модель № 1: $S_1 - St(\sigma) = 0,99950$; $S_2 - St(\sigma) = 1,00079$; $S_3 - St(\sigma) = 1,13490$.

б) модель № 2: $S_1 - St(\sigma) = 1,02237$; $S_2 - St(\sigma) = 1,02912$; $S_3 - St(\sigma) = 1,02227$.

2. Статус деформированного состояния $St(\varepsilon)$.

а) модель № 1: $S_1 - St(\varepsilon) = 1,00000$; $S_2 - St(\varepsilon) = 1,00000$; $S_3 - St(\varepsilon) = 1,00000$.

б) модель № 2: $S_1 - St(\varepsilon) = 1,03135$; $S_2 - St(\varepsilon) = 1,03135$; $S_3 - St(\varepsilon) = 1,03618$.

Анализ статусов подсистем свидетельствует о том, что предполагаемые веса изменений, предложенные выше, можно скорректировать таким образом: для модели № 1 – $Wt = 1$, для модели № 2 – $Wt = 2$, т.к. значение статусов изменяется незначительно в первом случае и существенно во втором. Также проведенный анализ показал, что значение статуса для установления влияния того или иного изменения в системе следует записывать до пятого знака после запятой, а также тот факт, что для каждой исследуемой системы повышенной сложности следует тарифировать систему статусов. Это связано с тем, что предполагаемое значительное изменение статуса для станции метрополитена мелкого заложения не подтвердилось,

поэтому следует протарифировать систему статусов таким образом: 1) статус равен 1,00000 – системы идентичны друг другу, изменения системы-вариации не вносят в НДС значительных изменений; 2) появление 5-го знака после запятой в значении статуса – системы практически идентичны друг другу; 3) появление 4-го или 3-го знака после запятой в значении статуса – незначительные изменения; 4) появление 2-го или 1-го знака после запятой в значении статуса – значительные изменения; 5) изменение значения статуса в 2 раза – система-вариация кардинально отличается от исходной системы.

Данное тарифирование системы статусов подходит к полученным данным, что видно из статусов деформированного состояния всех подсистем двух моделей. Из анализа этих статусов видно, что локальные изменения в модели № 1 не меняют статуса деформированного состояния подсистем, статусы подсистем модели № 2 свидетельствуют о значительном влиянии внесенных изменений во все подсистемы (появление второго знака после запятой). Из анализа статусов деформированного состояния также можно сделать вывод, что изменения, внесенные в исходную систему должны быть очень существенными (вес $Wt = 3...4$), чтобы значительно увеличить значение статуса. Анализ статусов напряженного состояния подсистем показывает, что его изменение более выражено, чем изменение деформационного состояния и достаточно внести флуктуацию параметра с $Wt = 2...3$, чтобы значительно изменить статус некоторых подсистем. Это достаточно выражено в случае модели № 1, в которой флуктуация с $Wt = 1...2$ (искривление колонны на 10 см) значительно увеличивает статус подсистемы S_3 (система колонн), незначительно изменяя статусы остальных подсистем. Причем статус подсистемы S_1 (окружающий массив) даже несколько уменьшился, что обусловлено изменением НДС конструкции, но данные изменения (4-й знак после запятой) являются незначительными.

Следует отметить, что проведенный анализ для его полноты следует дополнять анализом нормированных статусов, но такая процедура более трудоёмка и её выполнение затруднено отсутствием расчётных комплексов, которые могли бы её реализовать. Но такая процедура, проведенная один раз на основе первичного статуса, в дальнейшем бы позволила достаточно быстро, без кропотливого анализа отыскивать те расчеты, изменения в моделях которых приводят к уменьшению прочности и устойчи-

ности конструкций, а затем более тщательно их анализировать. Такая практика применения процесса определения статуса позволит проводить комплексный анализ НДС сложных систем с вносимыми в них изменениями, сберегая время на вариантный анализ, который можно опустить и, отыскав статусы напряженного и деформированного состояний системы или подсистем, переходить к анализу тех случаев, которые наиболее информативны.

Несомненно, предложенный процесс количественно-качественного анализа прочности на основе процесса определения статуса и описания изменений с помощью веса только начинает разрабатываться, но, имея явно выраженный прикладной характер, отличается актуальностью в области классификации изменений, влияющих на существенные параметры сложных систем, и отмечен научно-практической новизной и полезностью.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Тютюкин, А. Л. Понятия «ранга» и «веса» в комплексном анализе прочности и устойчивости тоннельных конструкций [Текст] / А. Л. Тютюкин // Тезисы 66 Межд. науч.-практ. конф. «Проблемы и перспективы развития железнодорожного транспорта», 11 – 12 мая 2006 г., Днепропетровск. – Д.: Вид-во ДНУЗТ, 2006. – С. 259-260.
2. Кендэл, М. Дж. Ранговые корреляции [Текст] / М. Дж. Кендэл. – М.: Статистика, 1975. – 214 с.
3. Петренко, В. І. Розрахунок трисклепінчастих станцій метрополітену глибокого закладення [Текст] / В. І. Петренко, В. Д. Петренко, О. Л. Тютюкін. – Д.: Наука і освіта, 2004. – 176 с.
4. Сеницын, А. П. Расчет конструкций на основе теории риска [Текст] / А. П. Сеницын. – М.: Стройиздат, 1985. – 304 с.
5. Шашенко, А. Н. Методы теории вероятностей в геомеханике [Текст] / А. Н. Шашенко, Н. С. Сургай, Л. Я. Парчевский. – К.: Техника, 1994. – 216 с.
6. Баклашов, И. В. Механика подземных сооружений и конструкции крепей [Текст] / И. В. Баклашов, Б. А. Картозия. – М.: Недра, 1984. – 415 с.
7. Бульчев, Н. С. Проектирование и расчет крепи капитальных выработок [Текст] / Н. С. Бульчев, Н. Н. Фотиева, Е. В. Стрельцов. – М.: Недра, 1986. – 288 с.
8. Современные методы прочностных расчетов в метро- и тоннелестроении [Текст] / Е. А. Демешко и др. // Сб. тр. науч.-техн. конф. «Подземное строительство России на рубеже XXI века», Москва, 15-16 марта 2000 г. – М.: ТАР, 2000. – С. 200-207.
9. Фролов, Ю. С. Метрополитены на линиях мелкого заложения. Новая концепция строительства [Текст] / Ю. С. Фролов, Ю. Е. Крук. – М.: ТИМР, 1994. – 202 с.

Поступила в редколлегию 28.11.2008.