

УДК 624.012.35/45

**Замалиев Ф.С.** – кандидат технических наук, доцент

E-mail: em\_z@mail.ru

**Казанский государственный архитектурно-строительный университет**

Адрес организации: 420043, Россия, г. Казань, ул. Зелёная, д. 1

### **Численные эксперименты в исследованиях пространственной работы сталежелезобетонных перекрытий**

#### **Аннотация**

Для выявления пространственной работы сталежелезобетонных конструкций использовано численное моделирование. Численный эксперимент проведен с помощью программного комплекса ANSYS. Расчетная модель откорректирована по результатам натурных испытаний крупномасштабной модели перекрытия. Приведены результаты численных экспериментов и сравнения с данными испытаний крупномасштабной модели.

**Ключевые слова:** сталежелезобетонные конструкции, численные эксперименты, напряженно-деформированное состояние.

Для выявления напряженно-деформированного состояния сталежелезобетонных конструкций на сегодняшний день используются различные математические модели [1, 2] и экспериментальные исследования [3, 4]. Для экспериментальных исследований используются от разномасштабных моделей до фрагментов конструкций в натуральную величину. Однако проведение натурных экспериментов требует значительных материальных, людских и временных затрат. Поэтому очень часто для исследований выбирают численные модели, которые приводят к более быстрым результатам. Многие исследователи в поисках эффективных моделей используют численные модели, основанные на прикладных программных комплексах. На сегодня существует множество программных комплексов, используемых для моделирования работы элементов строительных конструкций. При выборе расчетного комплекса главным вопросом является рациональный выбор программного комплекса, чья модель наиболее точно учитывает действительную работу конструкций, геометрическую нелинейность поведения конструкции и нелинейные свойства материалов.

Решение задачи программным комплексом ANSYS осуществляется в три этапа. На первом этапе создается основа конечно-элементной модели исследуемой конструкции, включает в себя следующие процедуры:

- устанавливается физический тип задачи, настройка программы на решение задачи механики твердого деформируемого тела;
- выбирается тип конечного элемента, наиболее подходящий для решения поставленной задачи, образуются координаты узлов конечного элемента сетки и топология;
- указываются физические и механические свойства материалов конструкции (бетона плиты, стали балки, арматуры, анкерных устройств);
- строится геометрическая твердотельная модель конструкции. Для построения геометрической модели используется свой модуль или экспортируется из какого-либо CAD пакета;
- геометрическая модель конструкции разбивается на конечные элементы, используются различные параметры сетки (густые и редкие) в зависимости от степени конкретизации;
- для сталежелезобетонной конструкции между стальной балкой и железобетонной плитой и анкерными связями определяется модель контакта и ее характеристики.

На втором этапе на модель накладываются условия и выполняется решение задачи:

- задаются граничные условия;
- выбирается тип анализа (статический, динамический и т.д.). Выбирается метод решения системы уравнений МКЭ и параметры вычислительных процедур (шаг нагружения, число итерации и др.);
- решается система уравнения, полученного МКЭ.

Третий этап – анализ результатов расчета. Рассчитанные МКЭ физические величины (перемещения, деформации, напряжения и т.п.) представляются в виде картинок, таблиц, графиков, анимации.

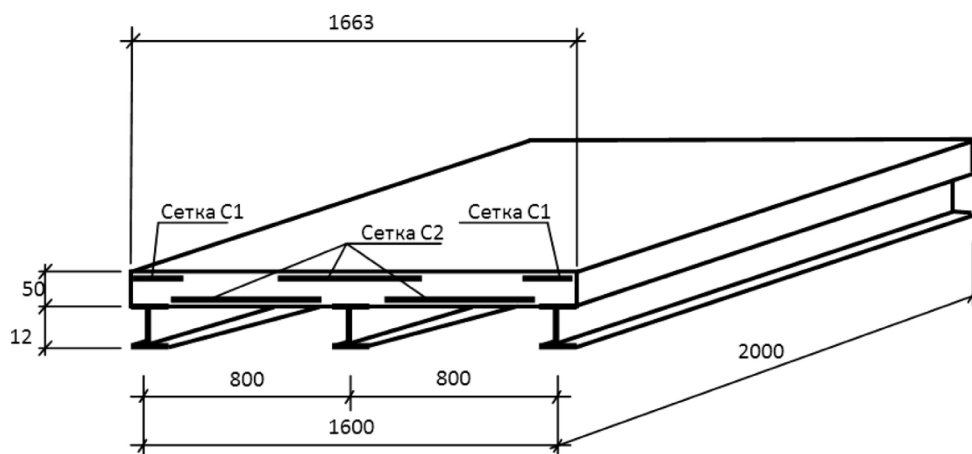


Рис. 1. Конструкция и армирование фрагмента перекрытия

Расчетная модель сталежелезобетонного перекрытия имела такие же параметры, что и экспериментальная модель. Экспериментальный образец фрагмента имеет следующие параметры: железобетонная плита с размерами 2000x1664 мм высотой 50 мм, армированная вязаной сеткой 3ВрIх100 на 4ВрIх200, подкрепленная тремя прокатными двутаврами № 12 по ГОСТ 8239-89 длиной 2000 мм, расположенными с шагом 800 мм (рис. 1). Совместная работа стальных балок и железобетонной плиты достигнута за счет двух рядов вертикальных анкерных стержней, приваренных по всей длине в верхнем поясу двутавров с шагом 100 мм по концам и 150 мм – в середине пролета [3].

В программном комплексе ANSYS анкера моделировали об высотой 40 мм, марка стали (С235), совместная работа обеспечивалась контактом Rough. Анкера с двутавром были объединены в одну конструкцию для большей наглядности, а в железобетонной плите оставлялись отверстия.

Следующим этапом моделирования является выбор материалов и указание их свойств. Для этих целей существует отдельный модуль управления материалами, связанный с блоком анализа. Из библиотеки материалов общего пользования использовались два материала:

- конструкционная сталь;
- бетон со своими физико-механическими свойствами в табличной форме.

Пластические свойства стали учитываются через нелинейную модель материала, вводятся пределы текучести и касательные модули материала. По заданным значениям автоматически строятся диаграммы работы материалов.

Результаты численных исследований сопоставлены с данными экспериментальных исследований, полученных на фрагменте сталежелезобетонного перекрытия.

Фрагмент перекрытия испытан нагрузкой, приложенной в двадцати точках и распределенной по поверхности плиты с имитацией равномерно-распределенной нагрузки. Ввиду различной несущей способности крайних и средних сталежелезобетонных балок (в крайних балок несущая способность почти в два раза меньше средней балки) распределение нагрузок по площади фрагмента производилось через пятиуровневую систему траверс с разным соотношением «плеч» – расстояний между точкой приложения нагрузок и опорами. Нагрузка на фрагмент перекрытия передавалась через систему траверс посредством гидравлического домкрата ДГ-100-2, величина задаваемой нагрузки фиксировалась и контролировалась при помощи манометра насосной станции [3].

Для получения численного решения выполнено разбиение геометрической модели фрагмента перекрытия конечно-элементной сеткой (рис. 2). При моделировании геометрии сталежелезобетонных конструкций использовались модели, созданные в Design Modeler. Процедура выполнена в модуле симуляции Mechanical. Сетка на объемных телах создается с помощью тетраэдрических или гексаэдрических твердотельных сеток. Для фрагмента перекрытия использована грубая сетка (Coarse) от  $91^{\circ}$  до  $60^{\circ}$ , средняя сетка Medium от  $0,75^{\circ}$  до  $24^{\circ}$ .

Сталежелезобетонное перекрытие моделировалось по схеме свободно оперной конструкции, нагруженной равномерно распределенной нагрузкой. Нагрузка прикладывалась в течение 6 сек. по 1 тонне, граничные условия накладывались посредством Remote Displacement.

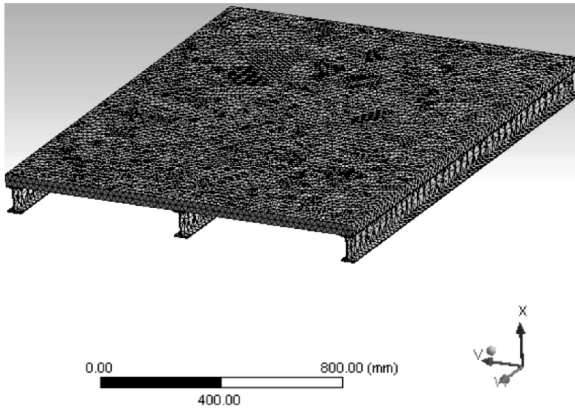


Рис. 2. Генерация конечно-элементной сетки

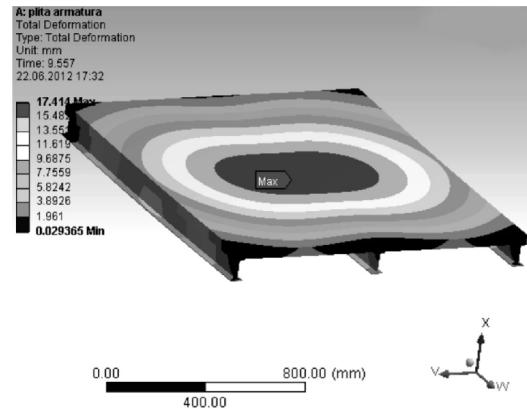


Рис. 3. Мозаика прогибов перекрытия

Исследованиями по программному комплексу ANSYS получены компьютерные картины развития прогибов (рис. 3) и картины развития деформаций в стальных балках и железобетонной плите (рис. 4, 5). Картины деформаций наглядно показывают последовательность развития деформаций в стальном профиле и железобетонной плите: как деформации развиваются от более напряженной зоны к менее напряженной; от середины к концам балок и от крайних волокон вглубь сечения; в железобетонной плите от середины пролета (в поперечном направлении) к стальным балкам, служащим опорами для плиты. Компьютерная картина динамики развития деформаций в стальных профилях фрагмента перекрытия отличается в меньшую сторону от деформаций отдельных сталежелезобетонных балок [6] (рис. 6). Из-за пространственной работы фрагмента перекрытия развитие деформаций как в стальных балках, так и в железобетонной плите идет менее интенсивно, численные значения деформаций и напряжений меньше на 20-30 % по сравнению с отдельными балками того же сечения. Кроме того, в перекрытии плита работает в двух направлениях, распределяет нагрузку стальных балок более равномерно.

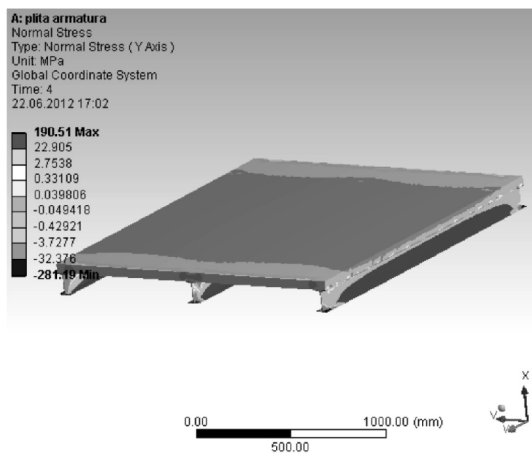


Рис. 4. Мозаика нормальных напряжений перекрытия

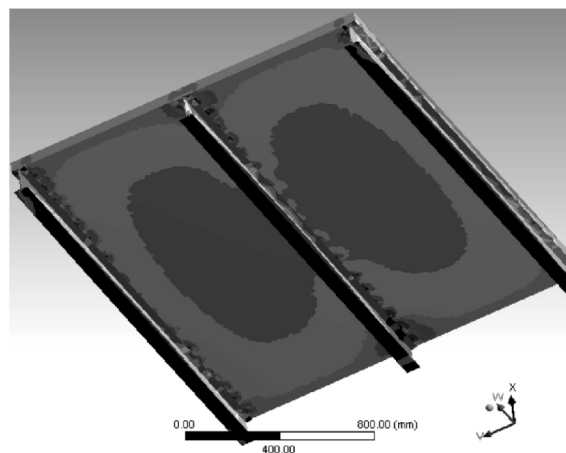


Рис. 5. Мозаика нормальных напряжений перекрытия (вид снизу)

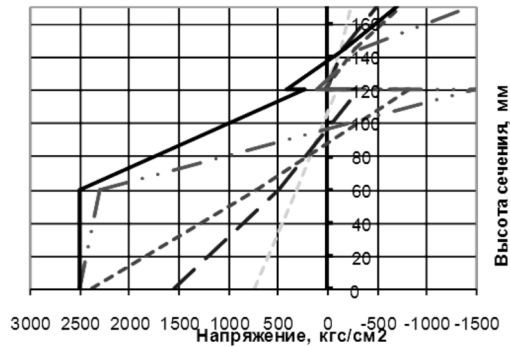


Рис. 6. Распределение напряжений по высоте сечения отдельной балки по результатам расчета

Рис. 6 показывает, что при одном и том же нагружении уровень напряжений в крайних фибрах средней балки перекрытия в 1,5-1,8 раза меньше, чем в отдельной сталежелезобетонной балке.

Построены графики распределения напряжений по высоте сечения средней и крайних балок перекрытия (рис. 7, 8) и диаграммы изменения прогибов (рис. 9) при разных нагружениях. Анализ распределения напряжений по высоте нормального сечения балки по результатам расчета на ANSYS и сопоставление с данными испытаний показывает, что при малых нагрузках в зоне упругих деформаций результаты схожи. Однако в численном эксперименте изменение положения границы сжатой зоны по мере увеличения нагрузки не соответствует экспериментальным данным. Большие расхождения получаются и при развитии пластических деформаций, в численном эксперименте пластические деформации развиваются интенсивнее, чем в натурном эксперименте. При больших нагрузках напряжения по ANSYS в зоне контакта «сталь-бетон» сильно отличаются от данных испытаний как по величине, так и по характеру.

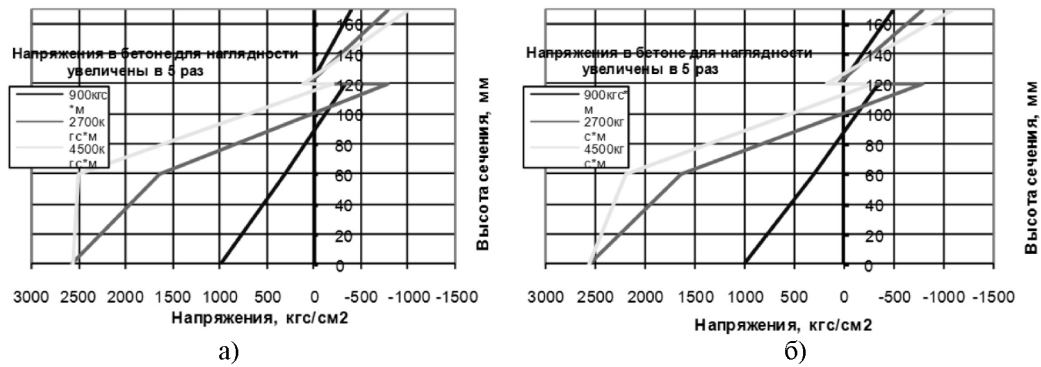


Рис. 7. Распределение напряжений по высоте сечения средней балки фрагмента перекрытия на различных этапах нагружения: а) по результатам на ANSYS; б) по результатам испытаний

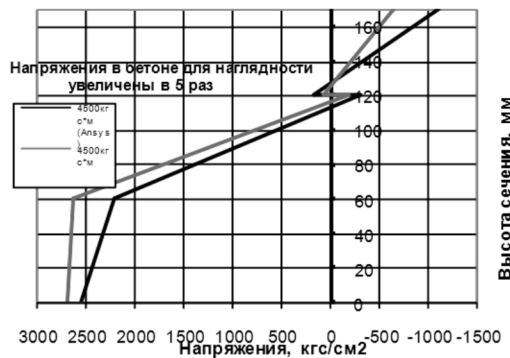


Рис. 8. Распределение напряжений по высоте сечения крайних балок фрагмента перекрытия  $M=4500\text{кгс}\cdot\text{м}$

Сравнение графиков прогибов средней балки перекрытия показывает, что наибольшая сходимость результатов расчета с данными натурального эксперимента получается в упругой стадии работы (рис. 9).

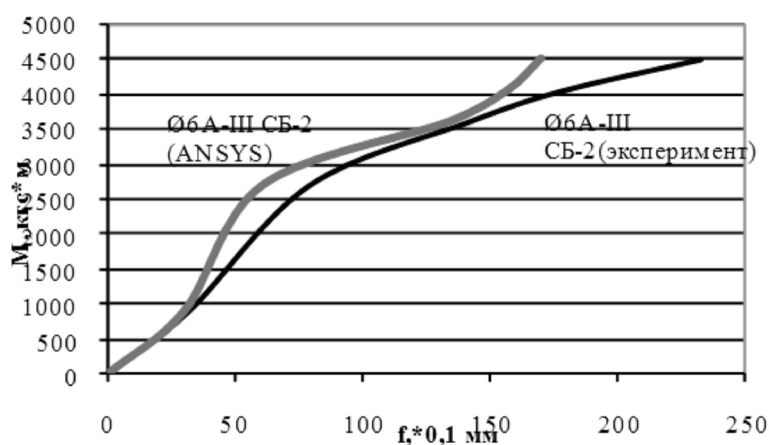


Рис. 9. График развития прогибов в координатах «М-f» для средней балки фрагмента перекрытия на различных этапах нагружения

### Заключение

1. При расчетах по программному комплексу ANSYS, базируясь на расчетную пространственную модель, можно получить достаточно достоверную картину распределения деформаций, напряжений, а также прогибов, показывающих пространственную работу конструкции в целом.

2. В расчетах при числовом моделировании за пределом упругости использование диаграмм работы материалов по данным натуральных экспериментов дает наиболее близкие результаты с данными натуральных исследований.

3. Для выявления закономерностей развития деформаций и напряжений в сталежелезобетонных конструкциях, особенно в плитной части, необходимо продолжить экспериментальные исследования пространственной работы конструкций.

### Список литературы

1. СНиП 2.05.03-84\* Мосты и трубы. – М.: Стройиздат, 1996. – 210 с.
2. EN 1994-1-1:2004 Еврокод 4. Проектирование сталежелезобетонных конструкций. Часть 1-1. Общие правила и правила для зданий. – 103 с.
3. Замалиев Ф.С., Шаймарданов Р.И. Экспериментальные исследования сталежелезобетонных конструкции на крупномасштабных моделях. // Известия КазГАСУ, 2008, № 2 (10). – С. 47-52.
4. Замалиев Ф.С., Сагитов Р.А., Хайрутдинов Ш.Н. Испытания фрагмента сталежелезобетонного перекрытия на статические нагрузки. // Известия КазГАСУ, 2010, № 1 (13). – С. 102-105.
5. Замалиев Ф.С., Шаймарданов Р.И. Экспериментальные исследования сталежелезобетонных балок на статические нагружения. Сборник статей международной конференции «Эффективные строительные конструкции: теория и практика». – Пенза, 2002.
6. Замалиев Ф.С., Гурьянов И.А., Шаймарданов Р.И., Хайрутдинов Ш.Н. Численные и натурные эксперименты в исследованиях сталежелезобетонных конструкций. // Известия КГАСУ, 2012, № 1 (19). – С. 46-52.

**Zamaliyev F.S.** – candidate of technical science, associate professor

E-mail: em\_z@mail.ru

**Kazan State University of Architecture and Engineering**

Editorial address: 420043, Russia, Kazan, Zelenaya st. 1

## Numerical experiments in researches of spatial work of steel-concrete floorings

### Resume

At research of steel-concrete designs there is a need of their analysis intense the deformed condition at various modes of loading. Different mathematical approaches are used in order to define stress-and strain mode. At the moment many researchers in search of effective model engage application software complexes, that is numerical experiment. However reliability of received data depends heavily on the chosen model of numerical experiment which should correspond to the physical model of structural behavior. Application software complex ANSYS was used for numerical experiment here. For initial data strength and geometrical parameters of experimental large-scale model of composite steel and concrete flooring were taken, testing of which took place at laboratory facilities of Kazan State University of Architecture and Civil Engineering. Experimental constructions as well as the method of full-scale tests are depicted in the paper, and the analysis of test result is carried out. Computer-aided pictures of deflection, stresses in composite steel and concrete construction are shown, stress and strain diagram of steel beam and RC slab for different level of loads is analyzed. Shown the pictures of tension reflecting spatial work of flooring. The comparative analysis of charts of deflections average is shown to a part of flooring in a zone of the steel profile, received by a settlement way according to the ANSYS program and according to tests of large-scale model of flooring at its spatial work.

**Keywords:** composite steel and concrete structures, numerical experiments, intense-deformed condition.

### References

1. SNIP 2.05.03-84\* Towers and tubes. – M.: SI, 1996. – 210 p.
2. EN 1994-1-1:2004 Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings. – 103 p.
3. Zamaliev F.S., Shaimardanov R.I. Experimental researches composite steel-concrete structures on large-scale models. – *Izvestiya KazGASU*, 2008, № 2 (10). – P. 47-52.
4. Zamaliev F.S., Sagitov R.A., Khayrutdinov Sh.N. Engineer Static load test of composite steel and concrete ceiling fragment // *News of the KSUAE*, 2010, № 1 (13). – P. 102-105.
5. Zamaliev F.S., Shaimardanov R.I. Experimental researches of steel-concrete beams on static loadings. Collection of articles of the international conference «Effective construction designs: theory and practice». – Penza, 2002.
6. Zamaliev F.S., Gurianov I.A., Khairutdinov Sh.N., Shaymardanov R.I. Numerical and natural experiments in probes of composite steel and concrete structures. // *News of the KSUAE*, 2012, № 1 (19). – P. 46-52.