

Прочностной расчет уникальных и высотных объектов с учетом газодинамических воздействий.

Доктор технических наук, профессор Голда* Ю.Л.,
доктор физико-математических наук Меньшов**И.С.,
кандидат технических наук Приходько* И.А.,
кандидат физико-математических наук Легкоступов*М.С.,
Маляренко А.А.

* - ОАО «26 Центральный научно-исследовательский институт»,

** - Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН,
ООО НПФ «

Предмет исследований

Настоящая работа посвящена исследованиям в области прочностного расчета зданий и сооружений с учетом газодинамических воздействий – воздействий газовой среды на здания и сооружения, в результате которых образуются газодинамические нагрузки на строительные конструкции.

Актуальность проблемы

Анализ разрушений зданий и сооружений в результате природных катастроф (землетрясений, ураганов), взрывов бытового газа, террористических актов показывает, что разработка и совершенствование методик расчета остается актуальной проблемой в гражданском проектировании и строительстве. В связи с разработкой в военной сфере высокоточных средств доставки обычных средств поражения актуальность проблемы разработки и совершенствования методик расчета зданий и сооружений еще больше возрастает как в гражданском строительстве (например, вопросы защиты объектов гражданской обороны), так и в военном проектировании, строительстве и фортификации.

Газодинамические воздействия

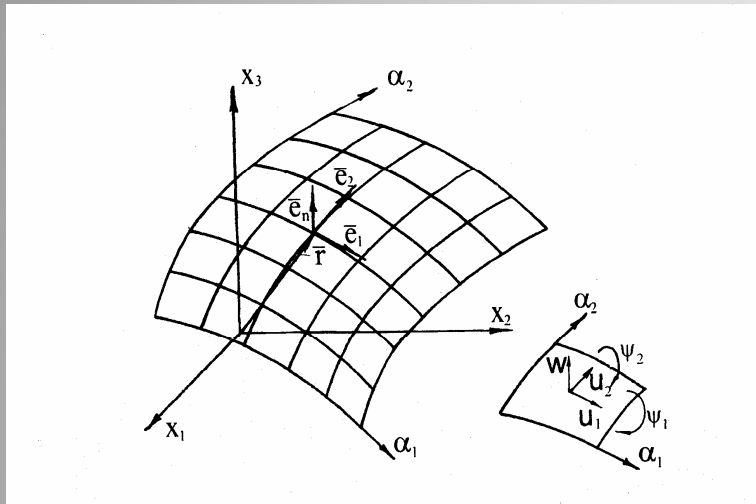
- Так как воздействие газовой среды может быть инициировано разными физическими процессами, то целесообразно выделить следующие виды газодинамических нагрузок:
- ветровая нагрузка;
- газодинамические нагрузки, возникающие при взрыве бытового газа или взрыва объемно-детонирующей смеси;
- газодинамические нагрузки, возникающие при взрыве заряда взрывчатого вещества или боеприпаса (обычные средства поражения);
- газодинамические нагрузки, возникающие в результате взрыва ядерного заряда (непрямое попадание).

Программное обеспечение

- В результате проведенных научно-исследовательских работ были созданы методики численного расчета и их реализация в программных комплексах для численного моделирования всех видов газодинамических воздействий, перечисленных выше [3].
- В исследованиях и прикладных газодинамических расчетах использовались два независимых программных комплекса: программный комплекс, созданный в Институте прикладной математики им. М.В. Келдыша [4], и программный комплекс "Гном-3D", разработанный во Всероссийском научно-исследовательском институте технической физики им. академика Е.И. Забабахина [5].
- В исследованиях и прикладных прочностных расчетах использовался лицензированный вычислительный комплекс «СКАД», и программное обеспечение 26 ЦНИИ МО РФ.

Математическая модель динамического деформирования конструктивных элементов в виде железобетонных оболочек и пластин

Система координат на срединной поверхности оболочки



Уравнения движения оболочки

$$\frac{1}{H_1 H_2} \left(\frac{\partial H_2 N_{11}}{\partial \alpha_1} + \frac{\partial H_1 N_{21}}{\partial \alpha_2} + N_{12} \frac{\partial H_1}{\partial \alpha_2} - N_{22} \frac{\partial H_2}{\partial \alpha_1} \right) + \frac{Q_1}{R_1} + q_1 = m \frac{\partial^2 u_1}{\partial t^2};$$

$$\frac{1}{H_1 H_2} \left(\frac{\partial H_1 N_{22}}{\partial \alpha_2} + \frac{\partial H_2 N_{12}}{\partial \alpha_1} + N_{21} \frac{\partial H_2}{\partial \alpha_1} - N_{11} \frac{\partial H_1}{\partial \alpha_2} \right) + \frac{Q_2}{R_2} + q_2 = m \frac{\partial^2 u_2}{\partial t^2};$$

$$\frac{1}{H_1 H_2} \left(\frac{\partial H_2 Q_1}{\partial \alpha_1} + \frac{\partial H_1 Q_2}{\partial \alpha_2} \right) - \frac{N_{11}}{R_1} - \frac{N_{22}}{R_2} + \frac{1}{H_1} \frac{\partial}{\partial \alpha_1} (N_{11} \omega_{11} + N_{12} \omega_{22}) + \frac{1}{H_2} \frac{\partial}{\partial \alpha_2} (N_{22} \omega_{22} + N_{21} \omega_{11}) + q_3 = m \frac{\partial^2 w}{\partial t^2};$$

$$\frac{1}{H_1 H_2} \left(\frac{\partial H_2 M_{11}}{\partial \alpha_1} + \frac{\partial H_1 M_{21}}{\partial \alpha_2} + M_{12} \frac{\partial H_1}{\partial \alpha_2} - M_{22} \frac{\partial H_2}{\partial \alpha_1} \right) - Q_1 + q_4 = I_m \frac{\partial^2 \psi_1}{\partial t^2};$$

$$\frac{1}{H_1 H_2} \left(\frac{\partial H_1 M_{22}}{\partial \alpha_2} + \frac{\partial H_2 M_{12}}{\partial \alpha_1} + M_{21} \frac{\partial H_2}{\partial \alpha_1} - M_{11} \frac{\partial H_1}{\partial \alpha_2} \right) - Q_2 + q_5 = I_m \frac{\partial^2 \psi_2}{\partial t^2}.$$

Динамическое деформирование бетона

Тангенциальные деформации

$$\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ij}^e + \varepsilon_{ij}^p + \varepsilon_{ij}^t$$

Вычисление напряжений

$$\sigma_{11} = \frac{E_b}{1 - \nu_b^2} (\varepsilon_{11}^e + \nu_b \varepsilon_{22}^e),$$

$$\sigma_{22} = \frac{E_b}{1 - \nu_b^2} (\varepsilon_{22}^e + \nu_b \varepsilon_{11}^e)$$

$$\sigma_{12} = \sigma_{21} = \frac{E_b}{1 + \nu_b} \varepsilon_{12}^e,$$

Статическое условие текучести

$$F = \frac{f(\sigma_{ij}, \chi)}{\chi} - 1 = \frac{k_f \chi I_1 + J_2^{\frac{1}{2}}}{\chi} - 1, \quad \chi \in [\chi_1, \chi_2],$$

Статическое условие прочности при двухосном сжатии

$$J_2^{\frac{1}{2}} = a - b I_1$$

Скорости упруго-вязкопластических составляющих деформаций

$$\varepsilon_{ij} - \varepsilon_{ij}^t = \frac{1 + \nu_b}{E_b} s_{ij} + \frac{1 - \nu_b}{E_b} I_1 \delta_{ij} + \eta_b \langle \phi(F) \rangle \frac{\partial g}{\partial \sigma_{ij}}$$

$$\langle \phi(F) \rangle = \begin{cases} 0 & \text{при } F \leq 0 \\ F^\delta & \text{при } F > 0 \end{cases},$$

Математическая модель динамического деформирования конструктивных элементов в виде железобетонных оболочек и пластин

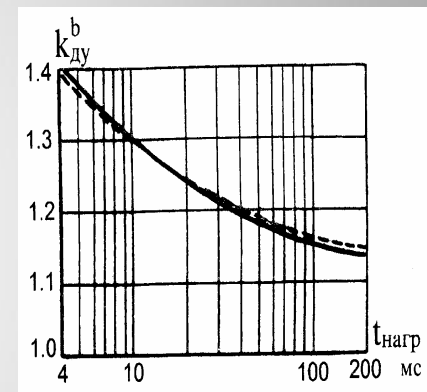
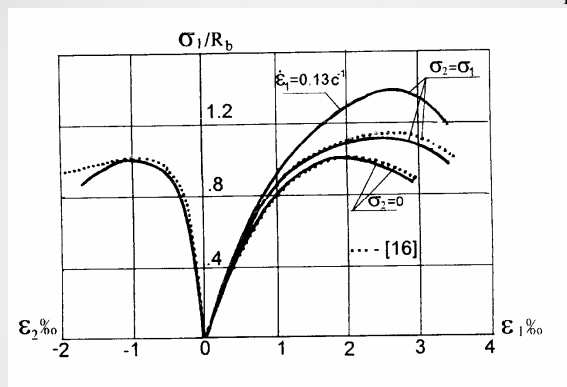
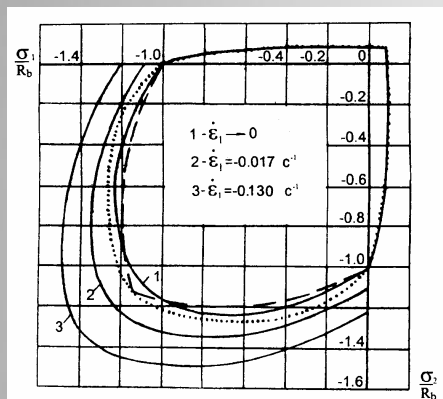
Условие прочности на отрыв: $\sigma_2 < F_t(\sigma_1)$

Деформации стержневой арматуры

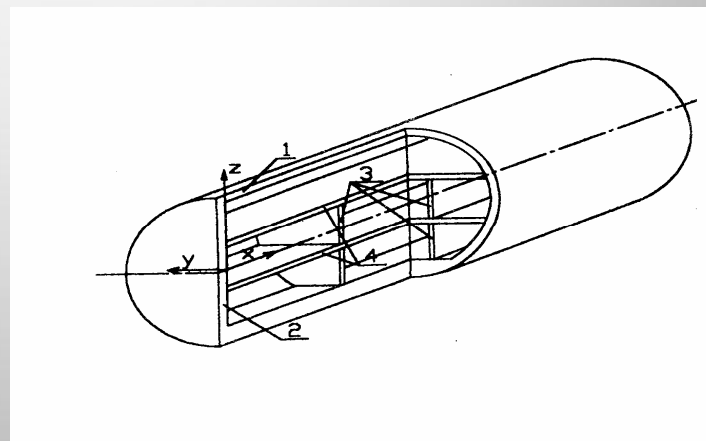
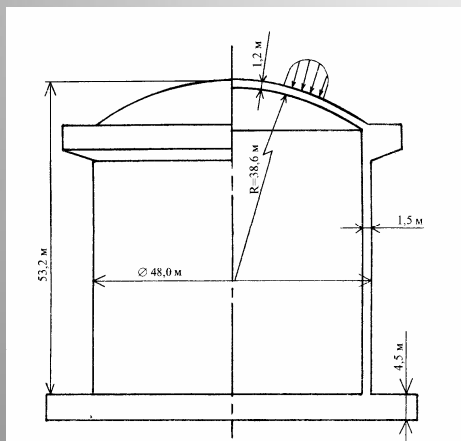
$$F_t = \begin{cases} R_{bt} & \text{при } \sigma_1 \geq -k_{тр} R_b \\ R_{bt} \left[1 - \frac{(\sigma_1 + k_{тр} R_b)^2}{(k_{тр} - 1)^2 R_b^2} \right] & \text{при } \sigma_1 < -k_{тр} R_b \end{cases}$$

$$\dot{\varepsilon}_s^p = \gamma_s \langle F_s^{\delta_s} \rangle \frac{2(\sigma_s - \chi_s \varepsilon_s^p)}{\sigma_T}; \quad \sigma_s = E_s \varepsilon_s^e;$$

$$F_s = \frac{(\sigma_s - \chi_s \varepsilon_s^p)^2}{\sigma_T^2} - 1, \quad \chi_s = \frac{E_s E_s^1}{E_s - E_s^1},$$



Примеры расчета конструкций



Пример расчета

- В данном докладе приведен пример расчета на динамические нагрузки от специальных воздействий комплекса административных зданий законодательной и исполнительной власти г. Москвы в ММДЦ «Москва-Сити» - участки №№ 15 и 1.

Модели газодинамического расчета

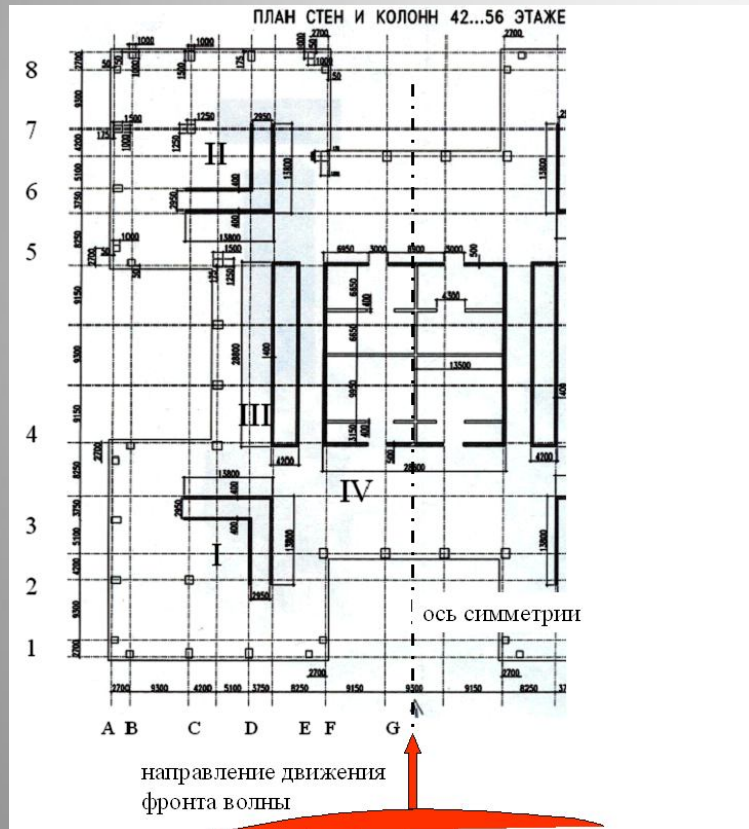
Исследования проводятся для двух моделей.

- **Модель А** описывает трехмерный процесс дифракции взрывной волны на здании. Поверхность здания при этом предполагается абсолютно жесткой и непроницаемой. Внутренние конструктивные элементы здания в расчете не учитываются. Анализ результатов расчета показал, что при данных параметрах воздействия все легкие конструкции и кирпичные перегородки высотного здания будут разрушены и снесены воздушной ударной волной. В этом случае достаточную для практики точность дает двумерная модель.
- **Модель Б** – двумерная модель прохождения взрывной волны в плоском горизонтальном сечении здания с учетом основных несущих конструкций: колонн, угловых и прямых ребер жесткости и центрального ядра жесткости с внутренними перегородками. Стеновые элементы в этой модели не учитываются.

Спецификации моделей

Модель Б:

Объект представлен набором отдельных конструктивных элементов. Каждый элемент моделируется абсолютно жестким телом. Среди этих элементов имеется 60 колонн прямоугольной формы, 4 симметрично расположенных угловых ребра жесткости и центральное ядро жесткости с внутренними перегородками.



Модель А:

Объект моделируется жестким телом в форме параллелепипеда, имеющего прямоугольные ниши на боковых сторонах. Фронт взрывной волны подходит слева от объекта. Угол падения волны составляет 90 град с фронтальной плоскостью.

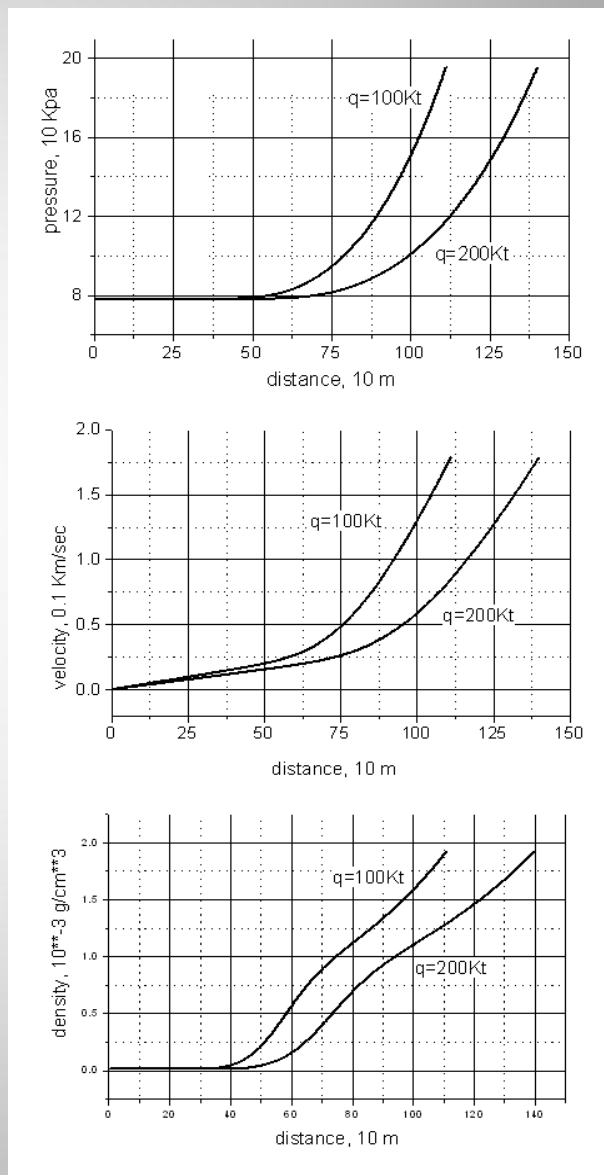
направление движения фронта волны



Параметры волны

Взрывная волна в начальный момент времени расположена в непосредственной близости от объекта. Течение за фронтом волны описывается одномерными сферически-симметричными уравнениями газовой динамики. Расчет этих уравнений ведется по методу Годунова второго порядка точности и явной схеме интегрирования по времени. Момент начала взаимодействия волны со зданием соответствует перепаду давления на фронте 1 кг/см^2 .

Распределение газодинамических параметров за фронтом волны на момент взаимодействия



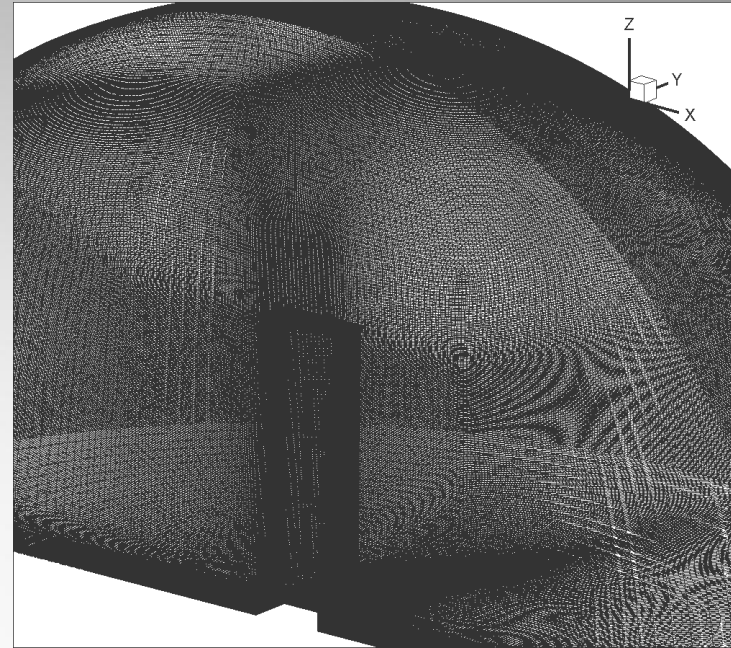
Характеристики численного метода

Расчеты по двумерной (Модель Б) и трехмерной (Модель А) проводились с помощью одной численной методики, основные характеристики которой следующие.

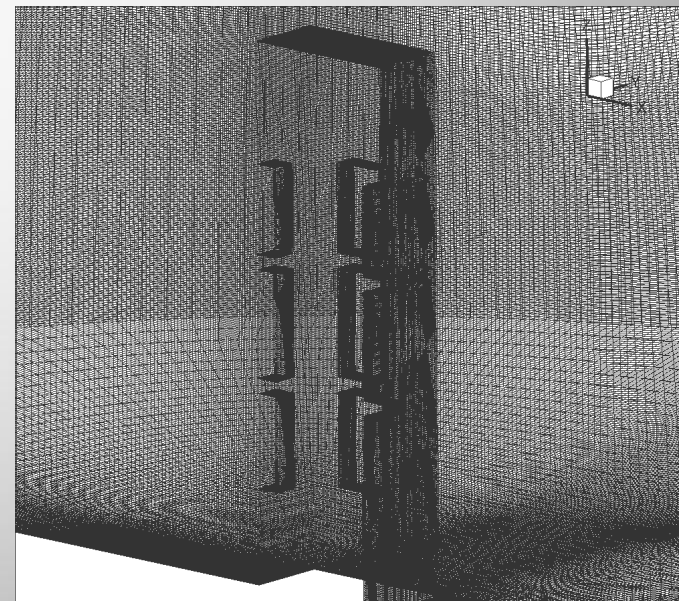
- Дискретизация уравнений по пространству: метод конечного объема на нерегулярной сетке.
- Аппроксимация численного потока: метод Годунова с точным решением задачи о распаде разрыва.
- Интегрирование по времени: явно-неявный гибридный метод.

Расчетная сетка модели А

Расчетная область представляет собой четверть сферы радиусом 600 метров, центр которой лежит в центре здания на уровне земли. Для более точного моделирования процессов вблизи стен здания внутри основной области вокруг здания сетка задавалась строго ортогональной с характерным размером **1 м**. К границам расчетной области сетка расширялась по логарифмическому закону. Размер сетки **10 748 656 ячеек**. Для расчетов на многопроцессорном вычислительном комплексе МВС 15000 ВМ Межведомственного суперкомпьютерного центра РАН использовали параллельный алгоритм. Количество использованных во время расчета **процессоров 100**. Шаг интегрирования по времени составлял 1 мс.

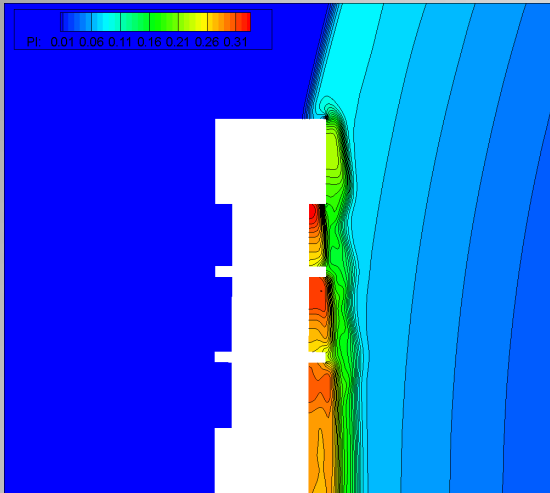


Полная сетка

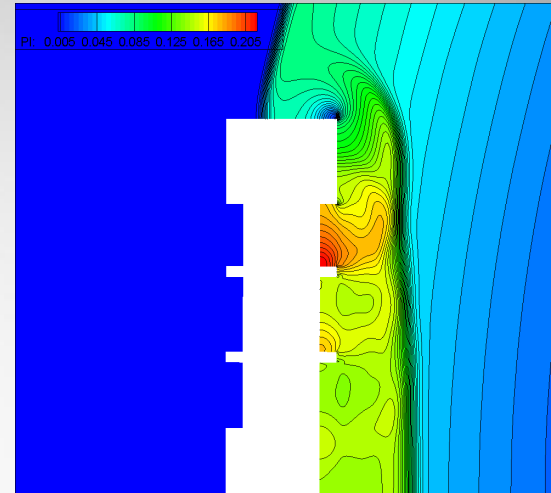


Сетка вблизи объекта

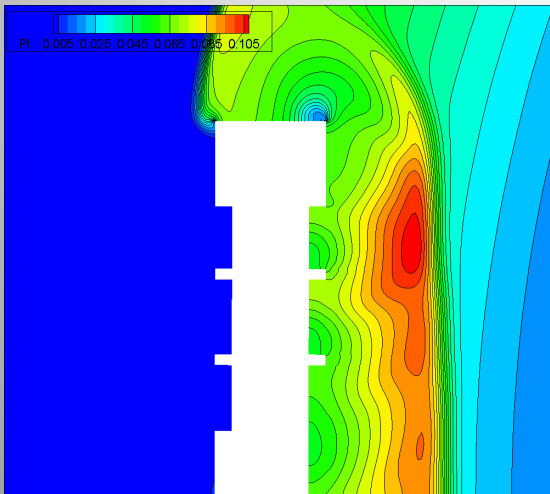
Поле избыточного давления на 4 последовательных момента времени



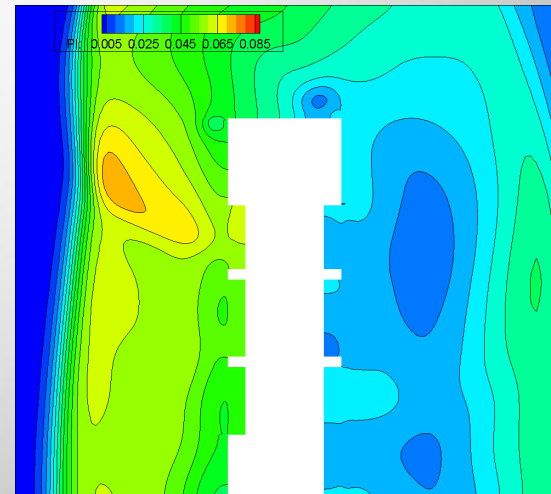
0,1 с после столкновения



0,2 с

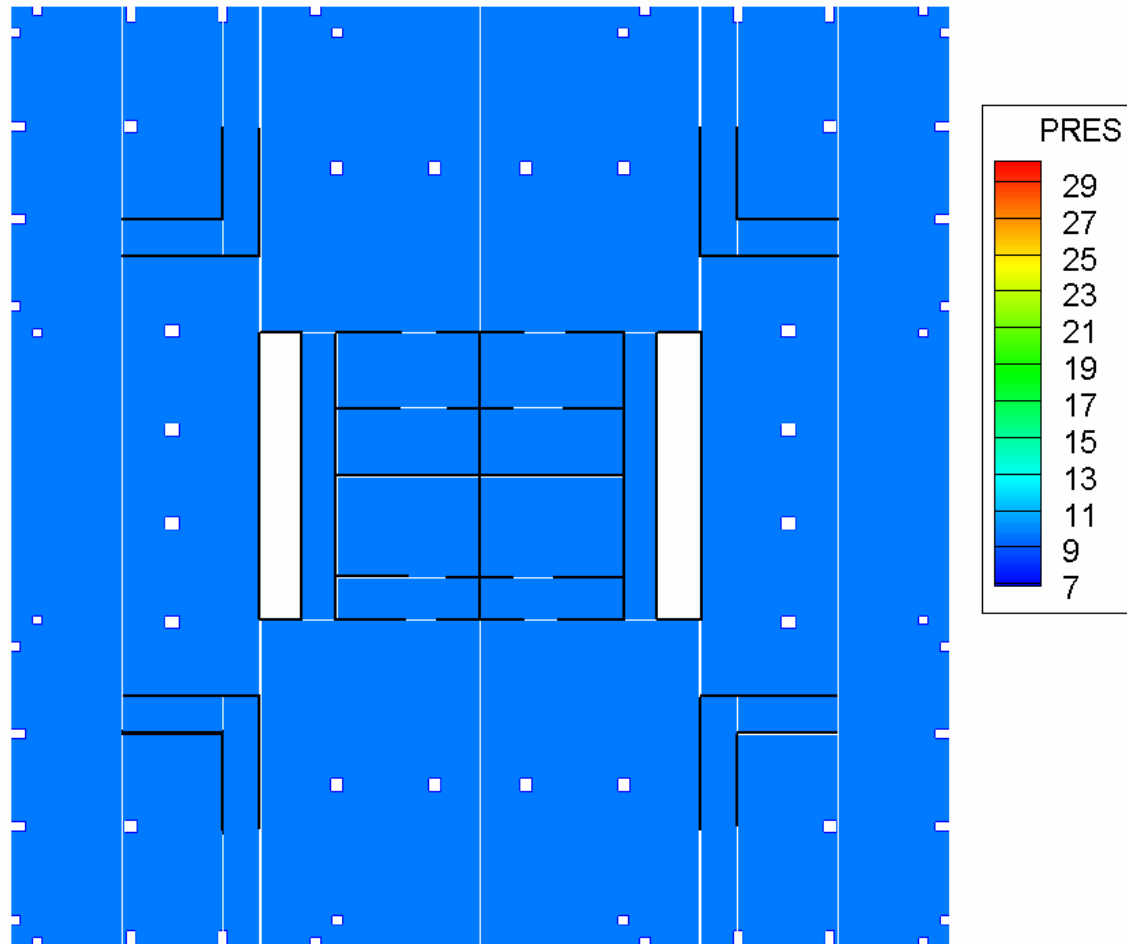


0,3 с

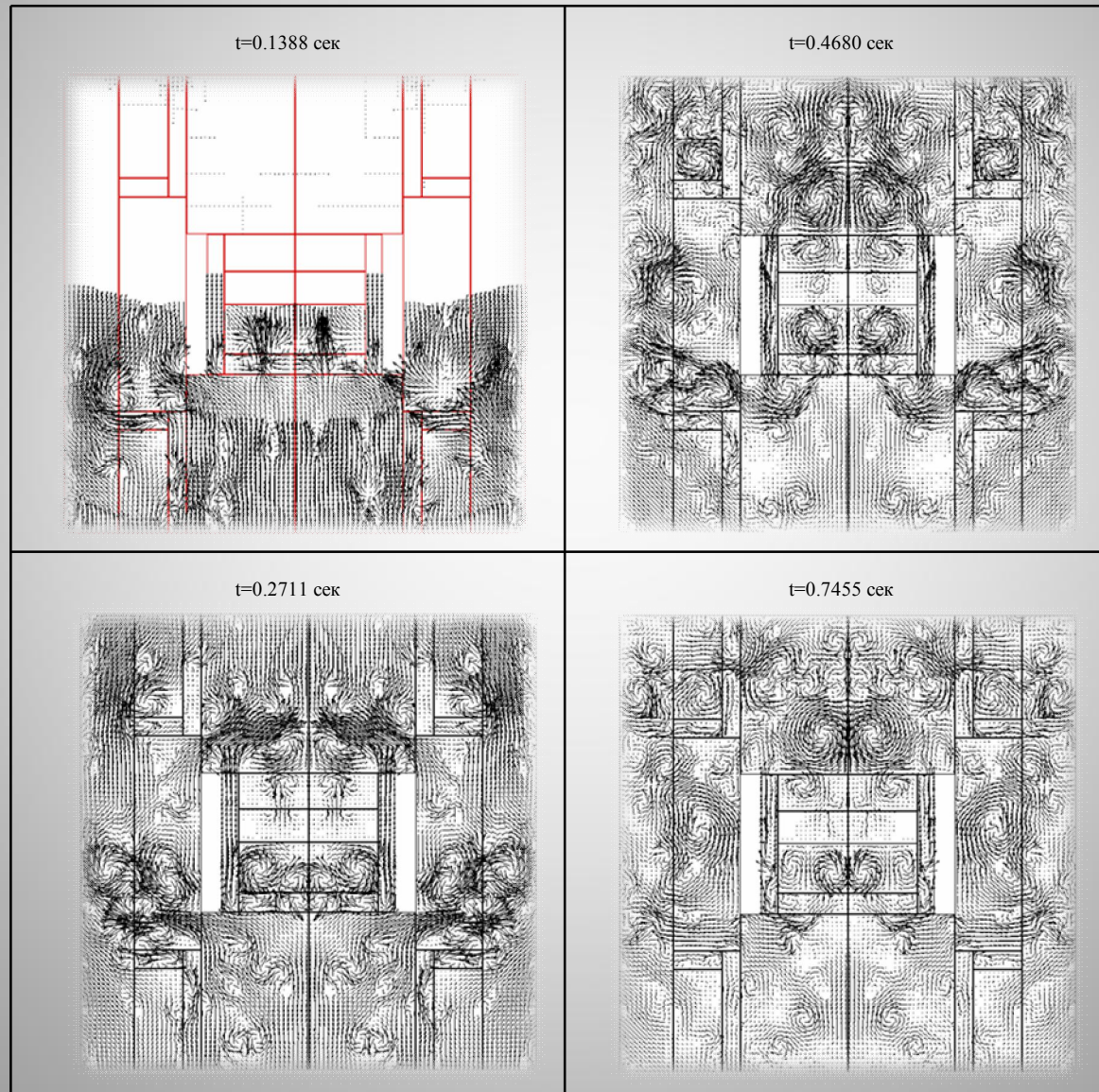


0,55 с

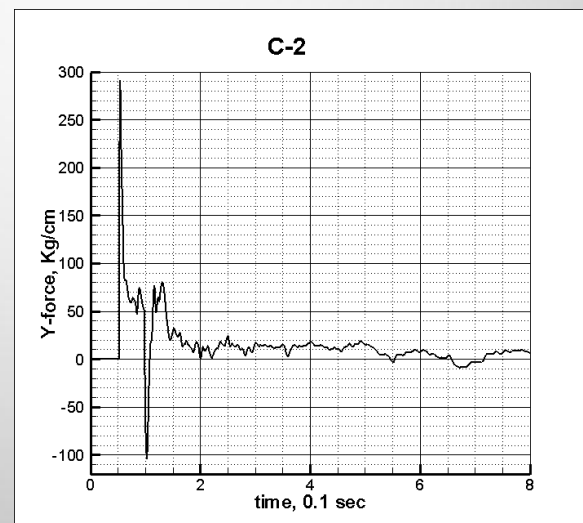
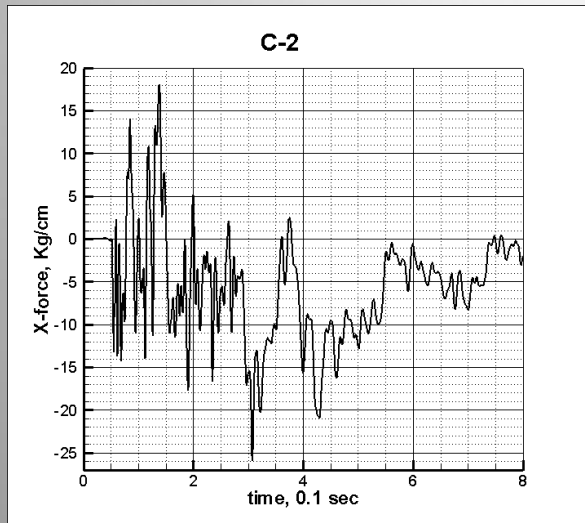
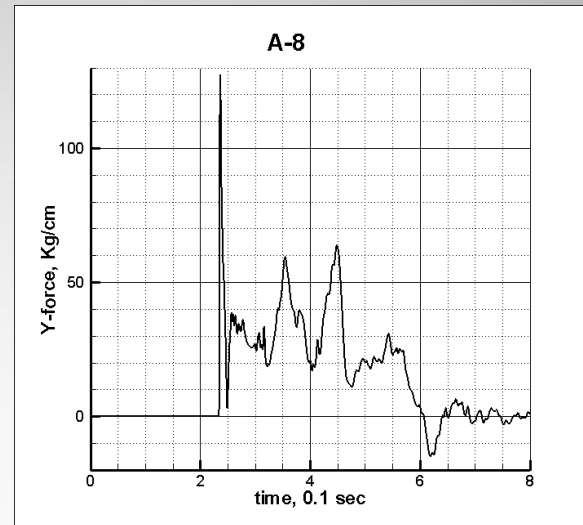
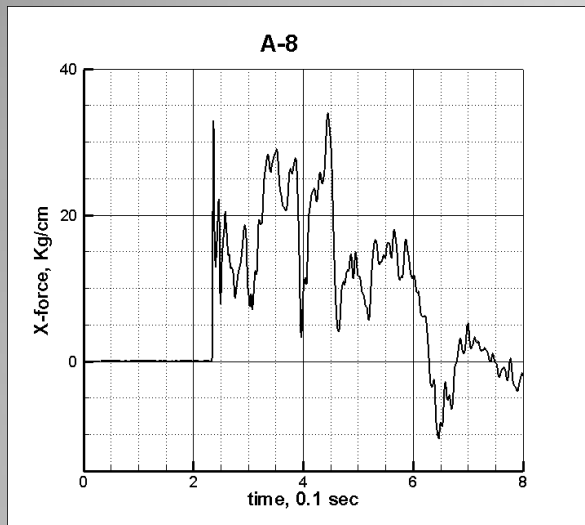
Визуализация поля давления (Модель Б)



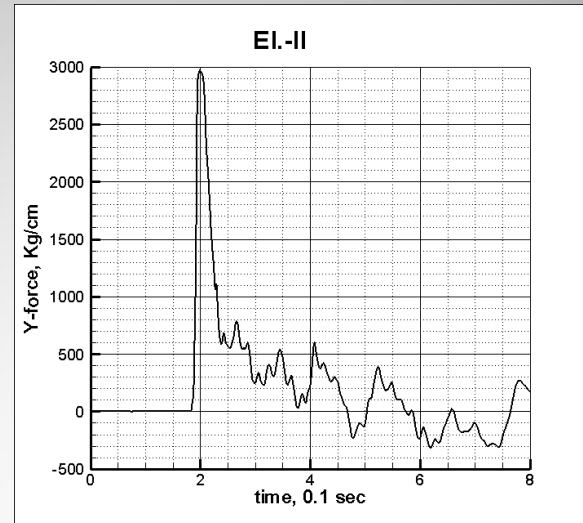
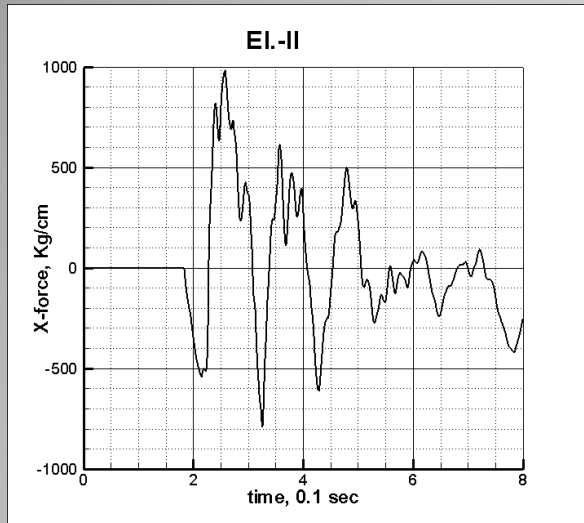
Образование крупных вихревых структур



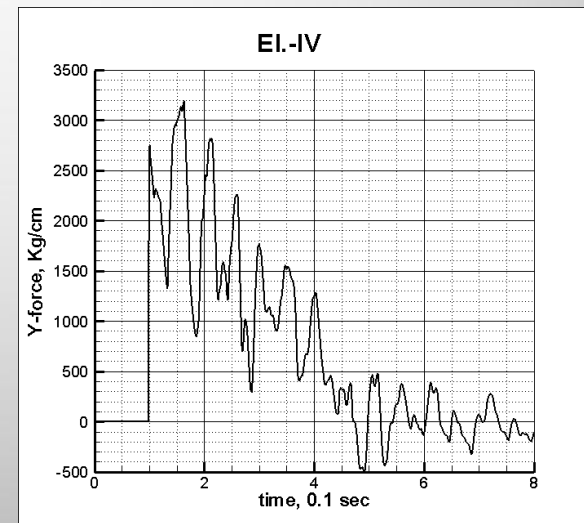
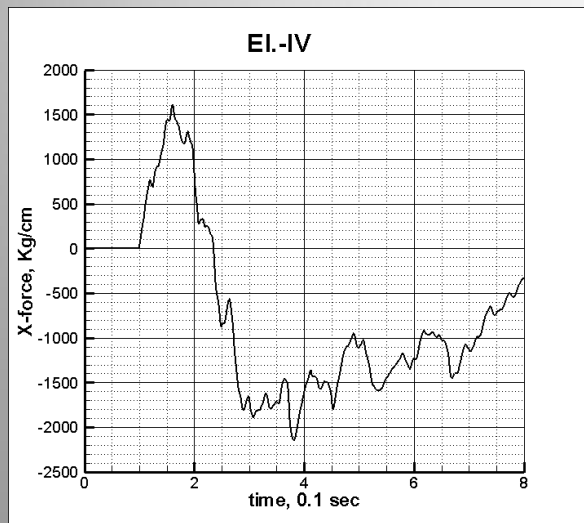
Примеры рассчитанных данных: нагрузка на колонны



нагрузка на угловые ядра жесткости



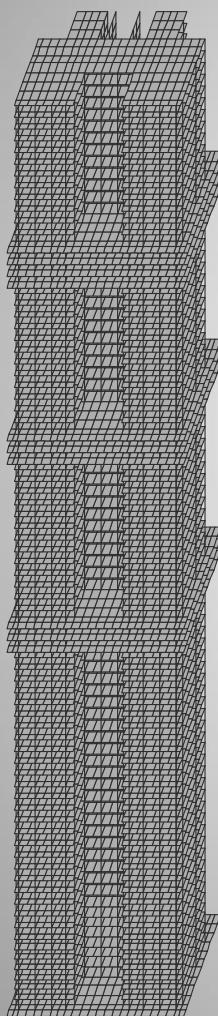
нагрузка на центральное ядро жесткости



Прочностной расчет высотного здания в ММДЦ «Москва-Сити»

- Цель расчета – проверка несущей способности здания при действии ВУВ, и в случае разрушения - анализ схемы разрушения конструкций.
- Здание имеет 6 подземных этажей и 72 надземных. Высота здания 309 м.
- Несущие элементы сооружений в методе конечных элементов задавались: фундаментная плита - четырехугольными оболочечными конечными элементами на грунтовом основании; перекрытия, покрытие, внутренние стены и пилоны - четырехугольными оболочечными конечными элементами, колонны – стержневыми конечными элементами.

Общий вид расчетной схемы



Результаты расчетов

КОЛОННЫ

Номер а колонн	Собственный вес и полезная нагрузка		Динамическая нагрузка		Суммарные усилия		Предельн ые усилия	Кэф фици ент запас а
	N, тс	M, тсм	N, тс	M, тсм	N, тс	M, тсм		
							N, тс	
1/К2	-10805	86	-2820	2179	-13625	2265	-20000	1.47
3/К2	-7987	409	-7860	2009	-15847	2418	-20000	1.26
7/К4	-2990	-94	-1397	-1531	-4387	-1625	-10000	2.28
9/К3	-7420	-109	-1281	1730	-8701	1621	-16200	1.86
17/К1	-8478	-201	-2870	-1152	-11348	-1353	-21000	1.85
27/К2	-7304	727	-1933	1625	-9237	2352	-17150	1.86

ядра жесткости

Номер а стен	Толщи на стены, м	Собственный вес и полезная нагрузка		Динамическая нагрузка		Суммарные усилия		Предельны е усилия	Кэфф ициент запаса
		N, тс /м	M, тсм/м	N, тс /м	M, тсм/м	N, тс /м	M, тсм/м		
								N, тс	
3	0.8	-2656	21	-3120	52	-5776	73	-6400	1.11
6	0.6	-1932	9	-1188	21	-3120	30	-5050	1.62
10	0.6	-1972	7	-2910	9	-4882	16	-5250	1.08
12	0.6	-1860	3	-1821	8	-3681	11	-5280	1.43