

УДК 624.042.7 : 622.235 : 622.271.3

В.В.Иванов, А.Г.Новиньков А.Г, С.И.Протасов

КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ РЕЗЕРВУАРОВ С УЧЕТОМ КОНВЕКТИВНОЙ МАССЫ ЖИДКОСТИ ПРИ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ ОТ МАССОВЫХ ПРОМЫШЛЕННЫХ ВЗРЫВОВ

Основным документом, регламентирующим сейсмическую безопасность зданий и наземных сооружений при массовых промышленных взрывах, является [1]. Принципиальным недостатком используемого в нем подхода является то, что нормируется не сейсмическая реакция защищаемого объекта, а сама нагрузка. Многообразие конструктивных форм объектов и значительная вариативность динамических характеристик и условий работы последних, не позволяет дать для них надежную количественную оценку напряженно-деформированного состояния от сейсмической составляющей взрывного воздействия. В силу этого, даже полное формальное соблюдение [1] не гарантирует безотказную работу защищаемых объектов. Многолетние сейсмологические исследования на объектах угольной и горнорудной промышленностей, проводимые специалистами КузГТУ, фирмой «Кузбасс-НИИОГР» и Алтайско-Саянской опытно-методической сейсмологической экспедицией, показали, что фактические сейсмические воздействия могут достигать уровня 7-8 баллов по шкале МСК. Данный уровень интенсивности воздействия уже требует оценки несущей способности с учетом сейсмических нагрузок. С другой стороны, существует отработанная методика расчета зданий и сооружений на сейсмические воздействия природного происхождения [2]. Однако прямой перенос положений указанного документа на условия промышленных взрывов имеет существенные ограничения. Прежде всего, эти ограничения связаны с тем, что вероятность наступления расчетного события при природных землетрясениях несравненно ниже, чем при ведении взрывных работ. По этой причине, исходя из теории сейсмического риска, используемый в [2] спектральный метод допускает в большинстве случаев развитие значительных повреждений и остаточных деформаций, не угрожающих жизнедеятельности людей и сохранности ценного оборудования, но влекущих ремонтно-восстановительные работы. Конечно, такое положение является неприемлемым для условий регулярных взрывов. Кроме того, длительности природных и техногенных воздействий, а также их спектральные составы имеют существенные отличия, соответственно будут отличаться и коэффициенты динамичности.

Следует отметить, что поскольку защищаемые объекты формально находятся в сейсмобезопасной зоне, то они возводятся в несейсмостойком исполнении. В сочетании с низким качеством

строительства и монтажа и высокой частотой повторяемости взрывных воздействий становится необходимым ведение мониторинга потенциально опасных объектов. Одним из таких потенциально опасных объектов являются карьерные резервуарные парки для хранения горюче-смазочных материалов. Особенностью расчета таких объектов является то, что сейсмическая нагрузка от массы жидкости может быть разложена на две составляющие – от присоединенной массы жидкости и конвективной массы, участвующей в процессе волнообразования. Полное (гидростатическое и гидродинамическое) давление жидкости может быть представлено в следующем виде [3]:

$$p(a, \theta, \eta, t) = -2\rho a^2 \sin(\theta) \times \sum_{i=1}^{\infty} \left(\frac{d^2 f_i(t)}{dt^2} a \frac{ch(\chi_i \frac{\eta + h}{a})}{ch(\chi_i \frac{h}{a})} + \frac{dv(t)}{dt} \right) \frac{b_i}{a} + \rho g \eta$$

где $f_i(t)$ – функция, определяющая волнообразование по i -ой собственной форме; $v(t)$ – функция изменений скорости колебаний основания; h – высота резервуара; ρ – плотность жидкости; θ, η – относительные координаты; a – радиус резервуара; t – время; χ_i – корень уравнения $J_1(\chi_i) = 0$, где $J_1(\chi_i)$ – функция Бесселя первого порядка; $b_i = 11/(\chi_i^2 - 1)$.

Также имеется решение при задании кинематического воздействия не во временном, а в частотном диапазоне, когда ускорение основания рассматривается как случайный процесс и задается в виде спектральной плотности [4].

Обе методики задания нагрузки позволяют использовать их в конечно-элементном анализе. Однако в связи с тем, что для реальных расчетов плотность конечно-элементной сетки должна быть достаточно высокой, а для каждого конечно-элемента используется индивидуальная функция давления от времени, то создание и управление такой моделью становится достаточно сложным делом, появляется вероятность ошибок. Альтернативой может служить конечно-элементная модель, где жидкость рассматривается как упругое тело с нулевой сдвиговой жесткостью. Взаимодействие между жидкостью и стенкой резервуара осуществляется с использованием уравнений связи для перемещений, нормальных к поверхности стенки. Вязкость жидкости не учитывается. Как

Таблица

Сравнительный анализ собственных частот жидкости в резервуаре, Гц

	Собственные частоты				
	[3]	0.248	0.42	0.532	0.619
Метод конечных элементов [МКЭ]		0.241	0.405	0.552	0.623

будет показано ниже, при сравнительно низких скоростях колебаний данная модель показывает хорошую сопоставимость с аналитическими решениями по полному давлению жидкости. Очевидным достоинством такого подхода является то, что в этом случае не требуется рассматривать связанные задачи взаимодействия жидкости и конструкции с последовательным переходом от решений на эйлеровых сетках для жидкости к лагранжевым сеткам для конструкции и обратно.

В качестве примера рассмотрим применение данного подхода для оценки несущей способности в условиях промышленных взрывов реального объекта. В рамках работ по обеспечению промышленной безопасности были проведены сейсмологические исследования резервуарного парка ОАО «Разрез Черниговский» и ОАО «Разрез Кедровский». Основу резервуарного парка составляют емкости вместимостью 1000 и 2000 м³. В ходе работ были записаны велосиграммы экспериментальных и промышленных взрывов мощностью от 23.7 до 194.2 т. Все взрывы – короткозамедленные, время замедления 20, 35 и 50 мс, масса заряда в серии от 1450 до 2528 кг. Кроме этого на микросейсмах определялись собственные частоты резервуаров с различным уровнем заполнения. Время осреднения от 15 минут. Использовались 15-канальная сейсмостанция "Гном" с частотой дискретизации до 512 Гц

и шестиканальная сейсмостанция "Байкал-11" с частотой дискретизации 400 Гц, а также трехкомпонентные сейсмоприемники СК-1П с резонансной частотой 1.0 Гц. Датчики устанавливались на основании возле емкости, а также на крыше резервуаров. Вывод информации осуществлялся на магнитные диски.

На первом этапе определялись собственные частоты колебаний жидкости. Использовался метод редукции динамических степеней свободы, – рассматривались только вертикальные перемещения узлов на верхнем слое жидкости. Сравнение

производилось с известными решениями по [3]. Результаты сравнения представлены в таблице. Первая собственная форма колебаний приведена на рис. 1.

Дальнейшая оценка достоверности расчетной модели производилась сравнением полного давле-

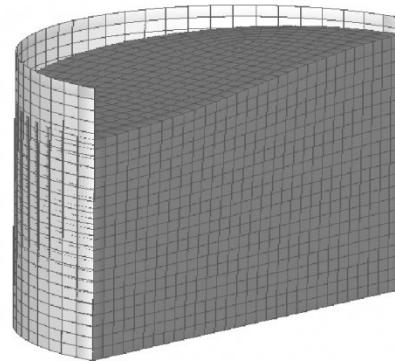


Рис. 1. Первая собственная форма колебаний жидкости. Частота – 0.24 Гц. Кровля резервуара условно не показана

ния жидкости, полученных МКЭ с аналитическим решением по [3] на записи экспериментального взрыва, модулированного до уровня семь баллов

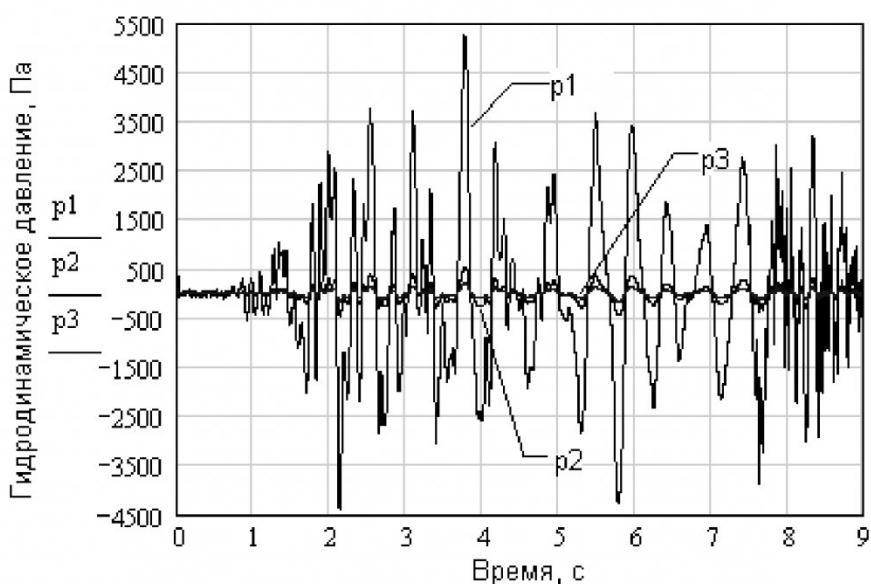


Рис. 2. Оценка вклада форм колебаний жидкости в величину гидродинамического давления. Р1, Р2 и т.д. – гидродинамическое давление от колебаний жидкости по первой, второй и т.д. формам соответственно

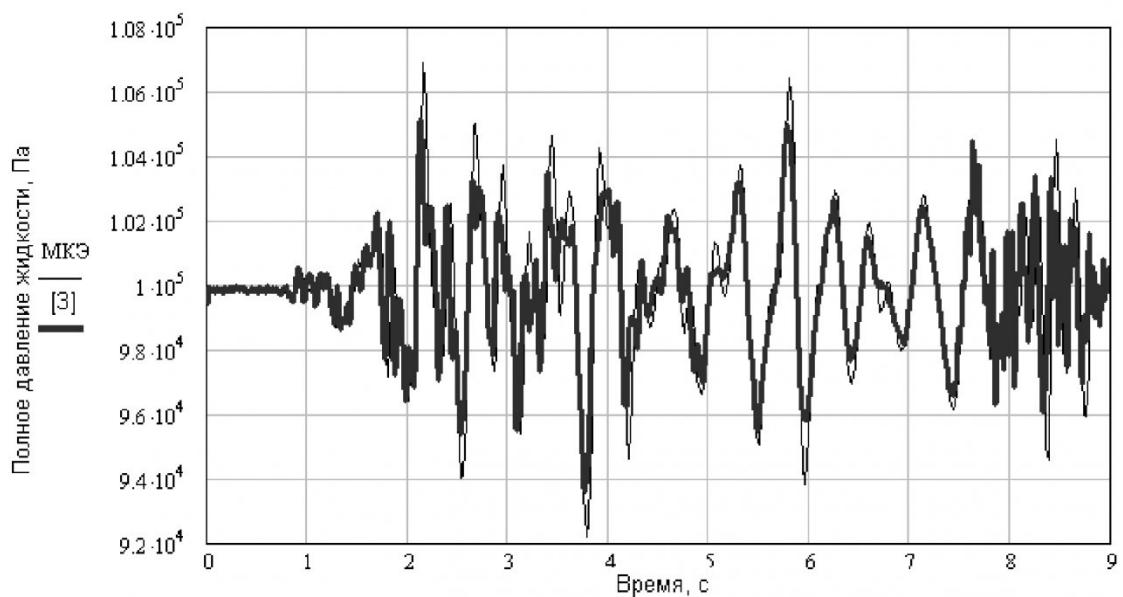


Рис. 3. Сравнение полного (гидростатического + гидродинамического) давления, полученного методом конечных элементов (тонкая линия) и решения по [3] (жирная линия)

по шкале МСК (максимальное ускорение – 1 м/с^2). Предварительно выполнялась оценка сходимости ряда в аналитическом решении. Решение дифференциальных уравнений производилось методом Рунге-Кутта четвертого порядка с фиксированным шагом. Оценка вклада форм колебаний по трем первым собственным частотам в общее гидродинамическое давление представлено на рис. 2. Было подтверждено, что основной вклад в величину гидродинамического давления вносят колебания

жидкости по первой собственной форме. В дальнейшем расчете удерживалось пять членов ряда.

В МКЭ динамический анализ производился прямым интегрированием по неявной схеме Ньюмарка. Интервал временной дискретизации 0.0025 с. Общее время отслеживания – 8.5 с. Частота записи в файл результатов – каждый 10-й этап загружения. Сравнение решений для полного давления жидкости, полученных по [3] и методом конечных элементов представлено на рис. 3.

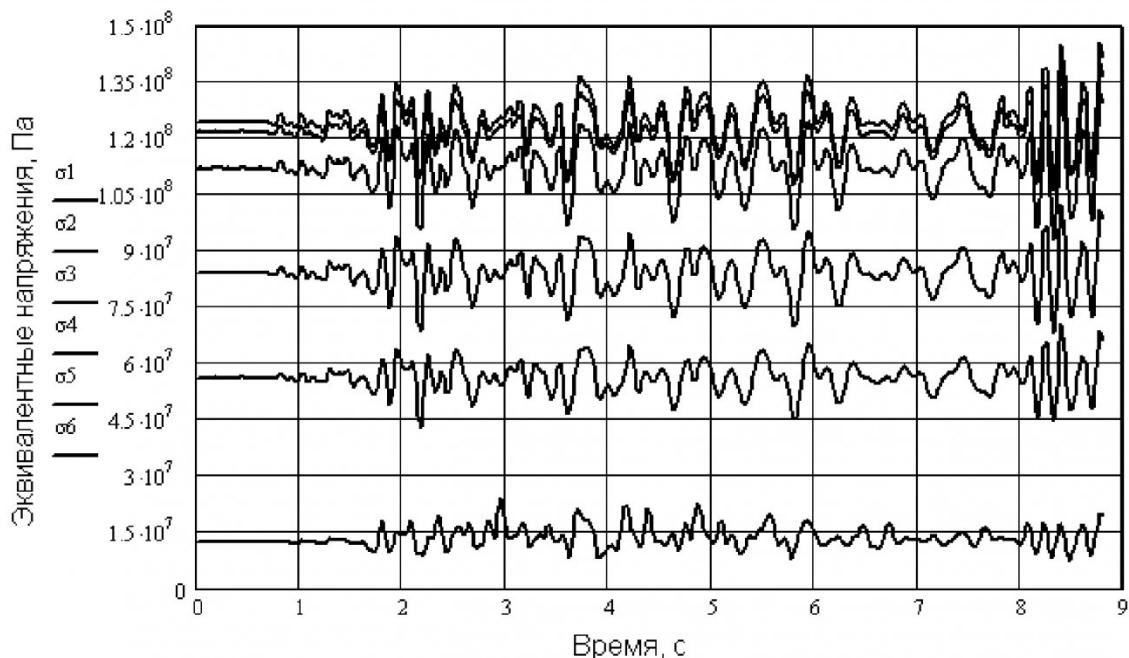


Рис. 4. Эквивалентные мембранные напряжения по критерию Губера-Мизеса в обечайке резервуара на различных расстояниях от поверхности воды

Было проведено несколько расчетов на реальные взрывные сейсмические воздействия. Все воздействия модулировались по амплитуде до величины эквивалентной ускорению в 1 м/с² при сохранении частотного спектра.

Анализ показал, что дополнительные мембранные напряжения в обечайке резервуара по критерию Губера-Мизеса, обусловленные гидродинамическим давлением жидкости, достигают 15-22% от уровня напряжений при гидростатическом давлении. Высота волны не превышает 6 см, что позволяет не рассматривать в качестве расчетного события удар волны в крышу резервуара.

Таким образом, несущую способность резервуаров, находящихся в зоне сейсмического действия массовых промышленных взрывов, если интенсивность последних достигает семи баллов по шкале МСК, следует определять с учетом дополнительных напряжений. При наличии концентраторов напряжений следует учитывать скоростной режим загружения, влияющий на возможность развития пластических деформаций. В первую очередь, это требование относится к конструктивным формам пониженной хладостойкости.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Единые правила безопасности при взрывных работах. ПБ 13-407-01. – СПб.: ДЕАН, 2002. 240с.
2. СНиП II-7-82*. Строительство в сейсмических районах. /Минстрой РФ. – М.: ГП ЦПП, 1996. 52с.
3. Гольденблат И.И., Николаенко Н.А. Расчет конструкций на действие сейсмических и импульсивных сил. – М.: Госстройиздат, 1961. 319 с.
4. Петров А.А. Оценка сейсмической реакции резервуаров с жидкостью // Промышленное и гражданское строительство. 1993. №5. с.3-4.

□ Авторы статьи:

Протасов
Сергей Иванович
- канд.техн.наук, директор фирмы «КузбассНИИОГР»

Иванов
Вадим Васильевич
- докт.техн.наук, проф. каф. теоретической и геотехнической механики

Новиньков
Алексей Геннадьевич
- канд.техн.наук, доц. каф. строительных конструкций

УДК 622.831

А. Н. Соловицкий

О ЗОНИРОВАНИИ БЛОЧНОГО МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД

Проведение зонирования блочного массива горных пород обеспечивает упорядочение геомеханического обеспечения геотехнологии освоения недр. Для учёта результатов зонирования предлагается следующая классификация:

- выделение зон геодинамической активности;
- выделение напряженных зон;
- выделение энергетически аномальных зон.

Предложенная классификация отражает исторический и технический аспекты развития данного вопроса [1,3-5].

Выделение зоны геодинамической активности производится по амплитудам движений блоков; выполненный анализ [1] показывает, что данный вид зонирования наиболее распро-

странен в настоящее время при освоении газовых и нефтяных месторождений, на которых получен ряд экспериментальных закономерностей.

Так, например, на основе ежегодных гравиметрических повторных наблюдений в течение 5 лет в Припятской впадине (нефтяные и газовые месторождения) установлено [2], что в зоне Речинского разлома годовые изменения локальных аномалий силы равны:

$-0,10 \cdot 10^{-5}$ мс⁻² за период исследований, равный 1 году;

$-0,04 \cdot 10^{-5}$ мс⁻² при периоде исследований 2,3 и 4 года.

Выделение напряженных зон блочного массива горных пород одна из главных задач зонирования при освоении угольных и рудных месторож-

дений. В зонах, где величины напряжений значительны, достаточно мощный взрыв может послужить толчком, инициирующим проявление геодинамических явлений, мощность и последствия которого зависят от накопленной потенциальной энергии. Последствия проявления геодинамических явлений особенно серьёзные в случае неоднородной блочной структуры массива горных пород.

Следует отметить, что в нетронутом блочном массиве горных пород не отмечается проявление геодинамических явлений, обусловленных естественными геодинамическими процессами, при скоростях деформации земной коры, оцениваемых $1 \cdot 10^{-5}$ - $1 \cdot 10^{-6}$ в год [1]. Следовательно, в напряженных зонах скорости деформаций