

ПОДГОТОВКА РАСЧЕТНЫХ АКСЕЛЕРОГРАММ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ГРУНТОВЫЕ ПЛОТИНЫ В ПРОГРАММЕ FLAC

Чукин Р.Б.

ИГиОН НАН КР

Для выполнения расчетов на сейсмическую устойчивость сооружений по динамической теории необходимо иметь подготовленную расчетную акселерограмму. Для понимания процесса подготовки записи ускорений рассмотрим приложение сейсмической нагрузки в программе FLAC более подробно. В программе FLAC ввод динамической нагрузки может быть осуществлен четырьмя способами, в виде:

- акселерограммы;
- скорости;
- напряжения или давления;
- силы.

В расчетной модели динамическая нагрузка прикладывается в виде граничного условия. Выше перечисленные способы выступают как множители к заданным значениям, характеризующим свойства материала, к которому осуществляется приложение динамической нагрузки. Эти заданные значения будут более подробно рассмотрены ниже. Множитель может быть представлен в виде:

- таблицы;
- специального файла называемым history;

- или функцией написанной в специализированном языке программирования FISH.

Например, если множитель представлен в табличной форме, то его значения и соответствующие значения времени сейсмической нагрузки представлены парой цифр в каждой строке. Временные интервалы в данной таблице могут быть разными. Использование табличной формы представления множителя не совсем удобно по сравнению с двумя остальными. Специальный файл history хранящий значения множителя, возможно, использовать только при одинаковых интервалах времени динамической нагрузки. Если используется функция, написанная на языке FISH, то она должна иметь доступ к динамическому времени расчета и моделировать множитель нагрузки соответствующий своему времени счета.

Динамическая нагрузка может быть приложена как в направлении оси x так и y по отношению к границе модели. Для ввода сейсмической нагрузки, как правило, используется не ускорения, а скорости расчетной сейсмической записи, которые затем трансформируются в нормальные или касательные напряжения через заданные характеристики грунта основания по формулам:

$$\sigma_n = 2(\rho C_p)v_n \quad (1)$$

$$\sigma_s = 2(\rho C_s)v_s \quad (2),$$

где σ_n - прикладываемое нормальное напряжение;

σ_s - прикладываемое касательное напряжение;

ρ - плотность грунта основания, к которому осуществляется приложение динамической нагрузки;

C_p - скорость распространения р-волн (волна сжатия) в грунте к которому осуществляется приложение динамической нагрузки;

C_s - скорость распространения s-волн (волна сдвига) в грунте к которому осуществляется приложение динамической нагрузки;

v_n - скорость вводимой записи по направлению нормали;

v_s - скорость вводимой записи по направлению сдвига.

В выражениях (1) и (2) напряжение должно быть удвоено, так как половина вводимой энергии поглощается вязкими граничными условиями модели, которые имитируют бесконечную среду. Данная формулировка идентична формулировки Джойнера и Чена /1/.

Рассмотрим пример приложения сейсмической волны. Импульс прикладывается как history файл касательного напряжения к основанию вертикальной колонны высотой 50 метров показанной на рисунке 1.

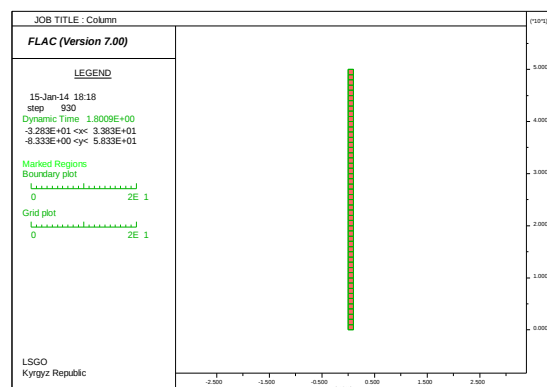


Рис. 1- Численная модель вертикальной колонны высотой 50 метров.

Основание колонны жестко зафиксировано и имеет поверхность затухания, а вершина колонны может свободно колебаться. Свойства материала колонны подобраны следующим образом: скорость распространения s-волны равна 100 м/сек, а произведение ρC_s составляет 10^5 (кг/м³*м/сек). Амплитуда импульса касательного напряжения устанавливается равной $2 \cdot 10^5$ Па в соответствии с выражением (2), что генерирует амплитуду скорости, равную 1м/сек в основании колонны. На рисунке 2 показаны значения скоростей

горизонтальных смещений записанных у основания в середине и на вершине колоны соответственно, вызванных сейсмической волной. Два последних импульса соответствуют прохождению отраженной волны в середине и в основании колоны. Эффект удвоения скорости на свободной поверхности так же как и отсутствие волн после примерно 1,3 секунды расчета подтверждает что граничные условия модели заданы корректно.

Эффект удвоения на свободной поверхности описан в работах посвященных упруго-динамическим моделям /2/. Важным аспектом при выборе размеров (мощности) основания модели является эффект удвоения скорости на поверхности. Если записать горизонтальные скорости вдоль модели колоны, то можно пронаблюдать увеличение амплитуды скоростей горизонтальных смещений на глубине 7 метров от вершины, как показано на рисунке 3. В общем случае, основываясь на примере модели упругой колоны высотой 50 метров, можно констатировать, что амплитуда скоростей горизонтальных смещений вершины колоны увеличивается в два раза по сравнению с прикладываемым к основанию импульсом. Таким образом, задавая основание модели мощностью в 50 метров исходную запись ускорений при подготовке ее к расчетной записи ускорений можно уменьшить вдвое. Данное утверждение всегда необходимо проверять на расчетах деконволюции. Под деконволюцией понимается процесс подбора расчетных характеристик прикладываемых нагрузок в основании модели так, что бы на естественной поверхности скального основания получить необходимые характеристики сейсмического воздействия. Для данной процедуры можно использовать как FLAC, так и специализированные программы, например SHAKE и другие.

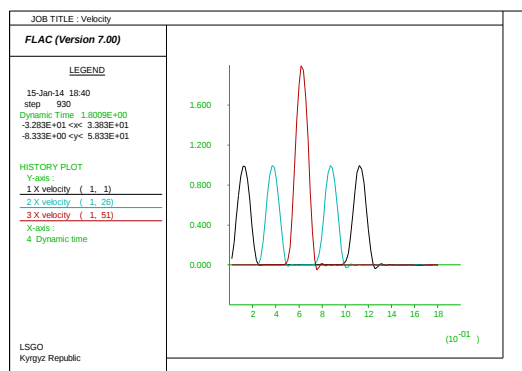


Рис. 2 - Значения скоростей записанных у основания (черная линия) в середине (голубая линия) и на вершине колоны (красная линия) соответственно.

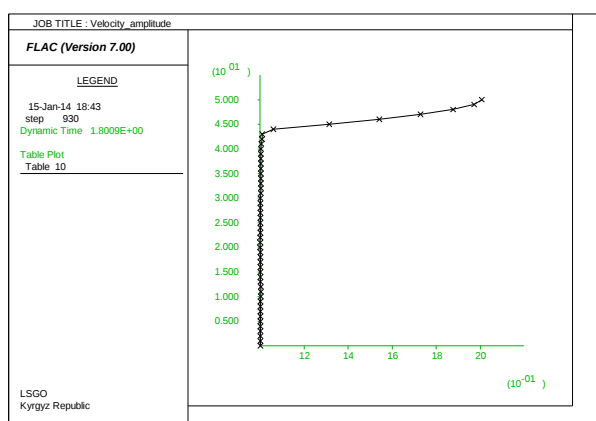


Рис. 3 - Амплитуда скоростей горизонтальных смещений вдоль тела 50-метровой колоны.

Согласно пункта 9.1.5 /3/ расчетную сейсмичность площадки строительства гидротехнического сооружения определяют инструментальным и расчетным методами сейсмического микрорайонирования. Чаще всего проектировщики не имеют в своем распоряжении акселерограммы полученные методами сейсмического микрорайонирования. Данных об интенсивности землетрясения на охваченных им территориях обычно нет, поскольку балльность оценивается визуальным анализом разрушений, повреждений и т.д. Качественные записи акселерограмм землетрясений являются

большой редкостью. Если акселерограммы и записывают, то лишь на сейсмостанциях, и, как правило, вдалеке от разрушенных объектов. Найти эти записи в оцифрованном формате очень трудно даже в интернете. Поскольку записи землетрясений являются базовыми характеристиками сейсмического воздействия, их по праву можно назвать основой многих научных исследований в области сейсмостойкого проектирования объектов, а значит важным фактором будущей сейсмической безопасности. Получив качественную и всеобъемлющую общедоступную информацию, о реальных сейсмических воздействиях ученые и специалисты смогут повысить надежность и ответственность всех решений направленных на сейсмическую безопасность /4/.

Рассмотрим пример подготовки записи Суусамырского землетрясения произошедшего в Кыргызской Республике (КР) 7 сентября 1992 года к расчетной записи. Это последнее в КР сильнейшее землетрясение магнитудой 7,4 и интенсивностью сотрясения в эпицентре 9-10 баллов. Запись ускорений самого землетрясения в цифровом виде найти не удалось. В распоряжении имеется откорректированная запись афтершока продолжительностью 23,95 секунды. Акселерограмма афтершока показана на рисунке 4.

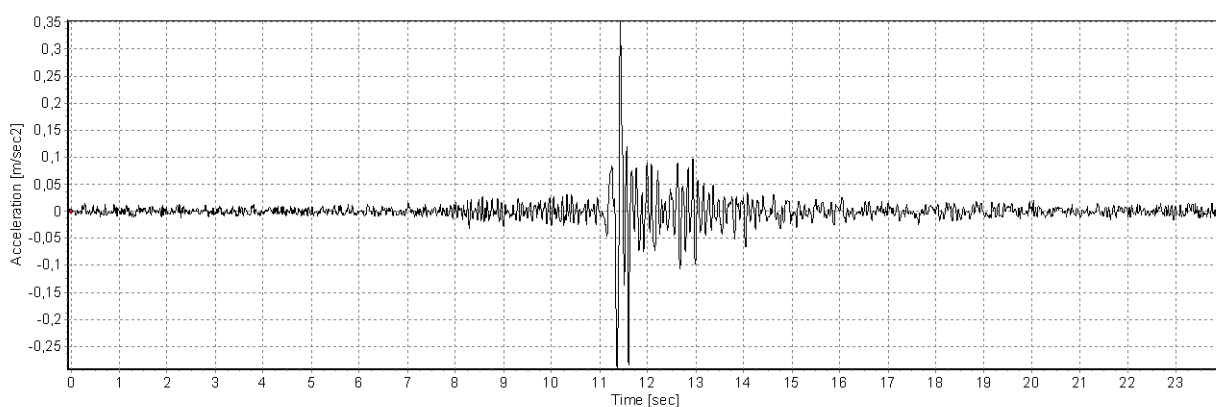


Рис. 4 - Акселерограмма афтершока Суусамырского землетрясения.

Максимальное ускорение $0,35306 \text{ м/сек}^2$ достигается на 11,43 секунде сейсмического воздействия. Сейсмостойкие объекты проектируются в соответствии с установленной расчетной сейсмичностью площадки строительства в баллах. Например, для площадки с сейсмичностью 8 баллов расчеты объектов будут выполняться с использованием акселерограмм, нормированных (масштабированных) к максимальному ускорению $0,2g$ согласно шкале MSK-64. При этом, значение $0,19g$ будет сочтено заниженным, а значение $0,3g$ – завышенным. Повысить или понизить расчетные значение пикового ускорения a_n можно только в два раза, путем согласованного повышения или понижения сразу на один балл по шкале MSK-64. Сейсмическое районирование осуществляется исключительно в баллах, что дает весьма условное задание уровней сейсмического воздействия. Это плохо согласуется с характеристиками реальных землетрясений, где не бывает фиксированных уровней /5/. Допустим, что предполагаемая площадка строительства находится в 9 балльной зоне согласно карте сейсмического районирования. Таким образом, пиковое ускорение на поверхности составит $0,4g$. Необходимо произвести масштабирование записи ускорений афтершока и подвести пиковое ускорение к необходимому значению с помощью расчетных коэффициентов, а также преобразовать из размерности м/сек^2 в g для большей наглядности. На рисунке 5 показана та же акселерограмма но уже после масштабирования. Предварительно данную запись уменьшаем вдвое согласно методике расчета 50 метрового скального основания

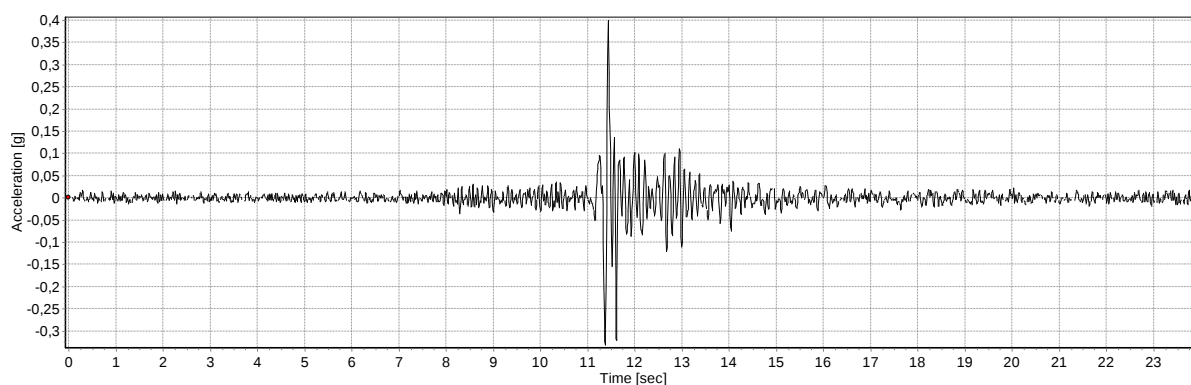


Рис. 5 - Акселерограмма афтершока Суусамырского землетрясения после процесса масштабирования к пиковому ускорению 0,4g.

описанной выше. На рисунке 6 показана акселерограмма загруженная в программу FLAC. Рассмотрим частотные характеристики записи ускорений, для этого произведем

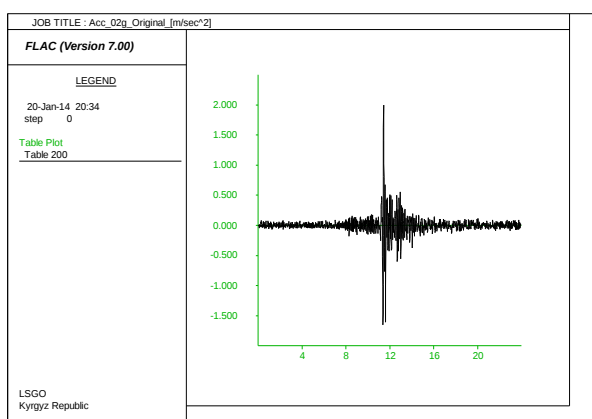


Рис 6 - Акселерограмма афтершока Суусамырского землетрясения загруженная в программу FLAC.

разложение в ряд Фурье. Результат анализа энергетического спектра ускорений представлен на рисунке 7. Из рисунка видно, что доминантная частота ускорений примерно 9 Гц. Наивысшие частотные компоненты меньше чем 10 Гц. Рассмотрим частотные компоненты записи скоростей. Для этого проинтегрируем один раз запись ускорений и произведем разложение в ряд Фурье. Результаты разложения скоростей показаны на рисунке 8. Из рисунка 8 видно, что

доминантная частота меньше 1 Гц. На следующем этапе производится процесс частотной отфильтровки записи ускорений и удаление из нее частот выше 10 Гц, т.к.:

- максимумы спектра находятся в диапазоне от 1 до 10 Гц;
- как правило, максимумы колебаний землетрясений не превышают частоту в 10 – 15 Гц.

Результат процесса частотной отфильтровки записи ускорения показан на рисунке 9.

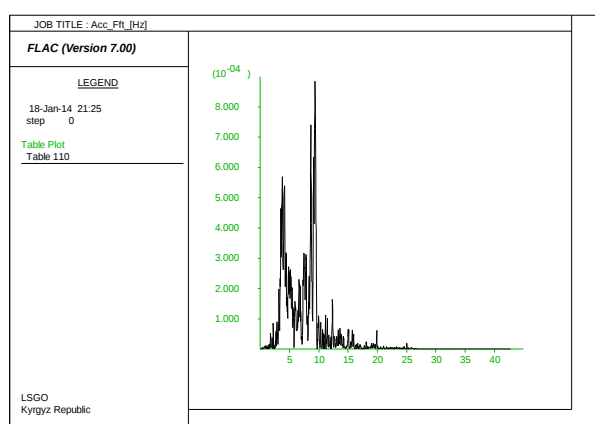


Рис. 7 - Энергетический спектр ускорений.

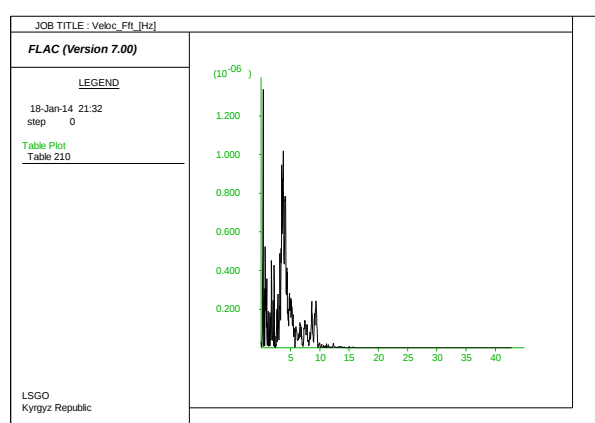


Рис. 8 - Энергетический спектр скоростей.

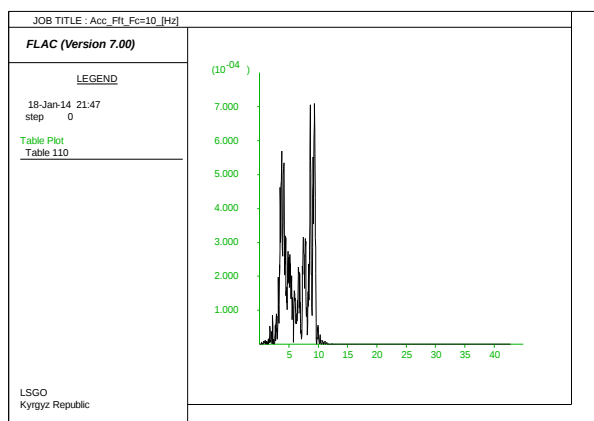


Рис. 9 - Энергетический спектр ускорений после применения фильтра в 10 Гц.

Далее проверяется вводимая запись на отклонение смещений от нулевой линии. Для этого интегрируется запись скоростей, что в результате дает волнообразную запись смещений соответствующую вводимой записи ускорений. Результирующее остаточное смещение примерно равно 0,0023 метра. Корректировка относительно нулевой линии осуществляется с помощью добавления низкочастотной синусоидальной волны к записи скоростей. Параметры синусоидальной волны регулируются так, чтобы конечные смещения приходили в ноль. На рисунке 10 показаны откорректированные и не откорректированные смещения. Отфильтрованная и откорректированная запись подготовлена к расчету. Согласно выражению (2) для задачи сейсмической нагрузки необходима запись скорости v_s , которая выступает как множитель. Вводимая скорость сейсмической нагрузки показана на рисунке 11. Далее производится деконволюция для проверки, что пиковые ускорения на поверхности достигают расчетных показателей в 0,4g. Если этого не произошло необходимо увеличить прикладываемую нагрузку. Сделать это можно двумя путями: во-первых, пойти на допущение и увеличить плотность материала или скорость прохождения волн, к которому осуществляется приложение нагрузки согласно выражению (2); во-

вторых, уменьшить запись не в два раза, а на меньший коэффициент и повторить расчеты. Первый способ является более быстрым в осуществлении, но менее корректный.

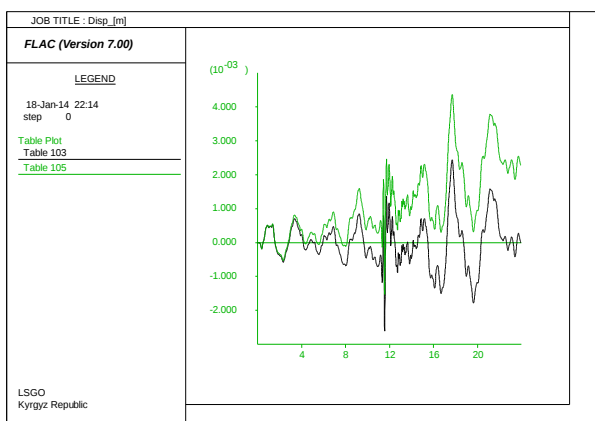


Рис. 10 - Откорректированные (черная линия) и не откорректированные (зеленая линия) относительно нулевой линии смещения.

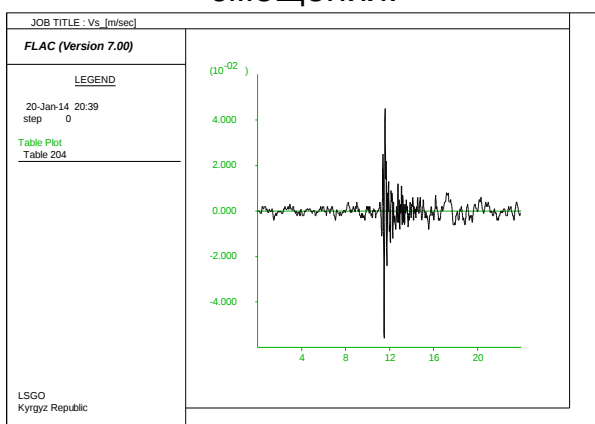


Рис. 11 - Вводимая скорость сейсмической нагрузки в расчетную модель, после процесса отфильтровки и корректировки нулевой линии.

Проведем расчет скального основания высотой 50 и шириной 100 метров показанного на рисунке 12, со следующими свойствами:

Плотность – $\rho = 2500 \text{ кг/м}^3$

Сцепление – $c = 0,0 \text{ Па}$

Угол внутреннего трения – $\phi = 38,0 \text{ градусов}$

Скорость распространения s-волн – $C_s = 750 \text{ м/сек}$

На рисунке 13 показано сравнение прикладываемой акселерограммы с записанными ускорениями на поверхности расчетной модели. Как

видно из рисунка пиковые ускорения достигли расчетных характеристик в 0,4g. На рисунке 14 показан график сравнения вводимой скорости и скорости полученной на поверхности модели.

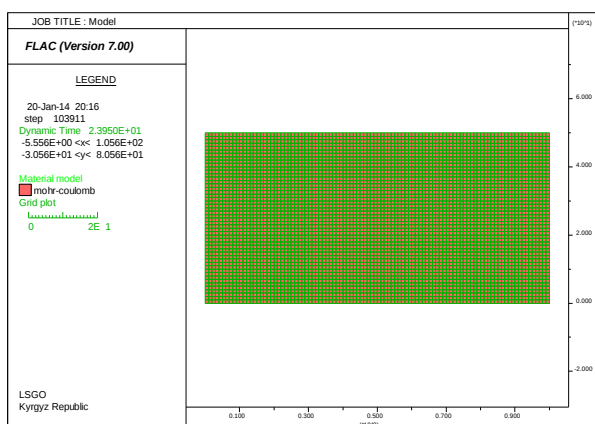


Рис. 12 - Модель скального основания для расчета деконволюции.

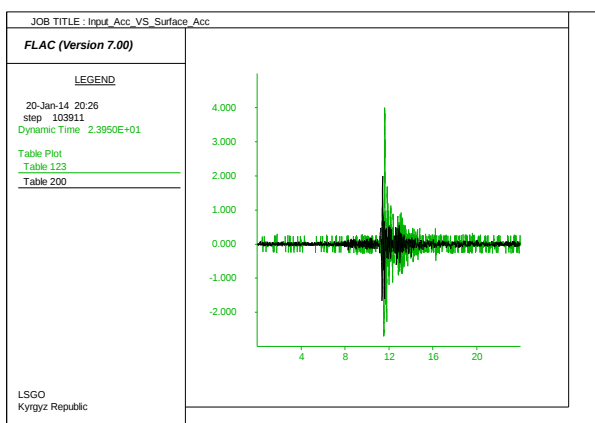


Рис. 13 - Сравнение прикладываемой акселерограммы (черная линия) с акселерограммой полученной на поверхности расчетной модели (зеленая линия).

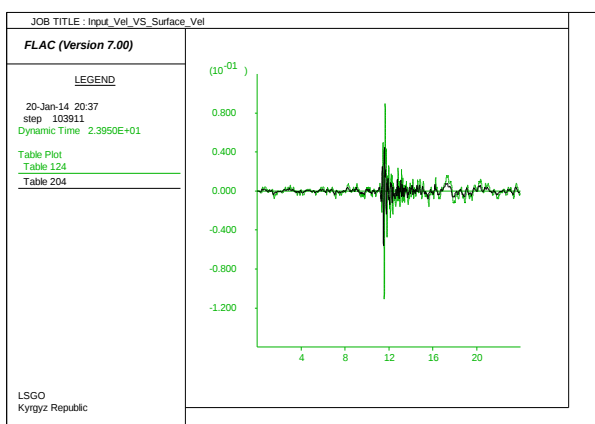


Рис. 14 - Сравнение прикладываемой скорости (черная линия) со скоростью, полученной на поверхности расчетной модели (зеленая линия).

Как видно из графиков сравнения скорость и ускорения на поверхности 50 метрового скального основания увеличились в два раза. Подготовка записи афтершока Суусамырского землетрясения закончена. Далее можно приступить к формированию локальных грунтовых условий для проверки их влияния на изменение сейсмической волны /6/ и выполнить расчеты сейсмической устойчивости грунтовых плотин на реальном грунтовом основании.

ЛИТЕРАТУРА

1. Joyner, W. B., and A. T. F. Chen. "Calculation of Nonlinear Ground Response in Earthquakes," Bulletin of the Seismological Society of America, 65(5), 1315-1336 (October 1975).
2. Graff, K. G. Wave Motion in Elastic Solids. New York: Dover Publications Inc. (1991)
3. СНиП КР 20-02:2009 Сейсмостойкое строительство. Нормы проектирования. Госстрой КР, 2009.
4. Idriss, I. M. "Response of Soft Soil Sites during Earthquakes," in Proceedings of the H. B. Seed Memorial Symposium, Vol. 2. Bi-Tech Publishing Ltd. (1990).
5. Ц. Ломниц и Е. Розенблюта, Сейсмический риск и инженерные решения, Недра, 1981 – Всего страниц: 374.
6. Seed, H. B., and I. Idriss. "Influence of Soil Conditions on Ground Motion During Earthquakes," J. Soil Mech. Found., Div. ASCE, **95**, 99-137 (1969).