

ГЛАВА 12. СИСТЕМА PUSHOVER ANALYSIS

Нелинейный статический анализ (Pushover Analysis) является частью характеристического метода сейсмического проектирования (Performance-Based Seismic Design) конструкций и сооружений. Суть этой философии сейсмического проектирования заключается в том, что при землетрясениях поведение конструкции и ее повреждения в основном зависят от деформаций, спровоцированных сейсмическим воздействием, а не от усилий в элементах, которые возникают от эквивалентного сейсмического воздействия. Ключевыми параметрами в характеристическом методе сейсмического проектирования являются «требование» и «несущая способность». «Требование» отображает сейсмическое колебание грунта, а «несущая способность» — способность сопротивляться «сейсмическому требованию». Конструкция должна обладать несущей способностью для сопротивления «сейсмическому требованию» для удовлетворения целей проектирования.

Нелинейная статическая процедура — это удобное средство для оценки несущей способности конструкций в ситуациях, когда прямой динамический метод является слишком сложным и трудоемким в применении к данной схеме, либо при анализе сейсмостойкости уже существующих зданий.

Во время выполнения процедуры нелинейного статического анализа конструкция подвергается нагрузке от собственного веса и монотонно растущему воздействию, которое задается в виде силовой нагрузки или перемещения и представляет собой эквивалентное сейсмическое воздействие. В большинстве разработанных методов статической нелинейной процедуры многомассовая расчетная модель (МРМ) преобразуется в эквивалентную одномассовую систему (ЭОМС) для упрощения и большего удобства расчета. Использование ЭОМС дает возможность избежать необходимости выполнения нелинейного динамического расчета исходной многомассовой расчетной модели. Результатом анализа является спектр несущей способности (кривая pushover), который дает важную информацию об общей прочности и податливости конструкции. Использование спектра несущей способности дает возможность вычислить неупругое перемещение ЭОМС — целевое перемещение, которое соответствует сейсмическому воздействию, выраженному через «сейсмическое требование». После расчета эквивалентной одномассовой системы происходит возвращение к МРМ с вычислением всех необходимых перемещений и анализом несущей способности элементов конструкции.

12.1 ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Для выполнения pushover-анализа при создании задачи в окне **Параметры проекта** необходимо установить флажок **В задаче будет использоваться система «PUSHOVER»** (см. п. 2.3). При этом будет автоматически установлен и флажок **В задаче будут присутствовать нелинейные элементы**. Для задания загружений, которые будут действовать на схему, нужно воспользоваться редактором загружений. Чтобы перейти в редактор, воспользуйтесь вкладкой ленты **Редакторы и конструирование** или командой меню **Редакторы** ⇨ **Редактор загружений** либо щелкните на кнопке  на панели инструментов. В данном виде расчета доступны следующие типы загружений (рис. 12.1):

- История нелинейного загружения;
- Стадия нелинейного загружения;

- Статическое нагружение;
- Сеймика с разложением по собственным формам колебаний;
- Спектр несущей способности.

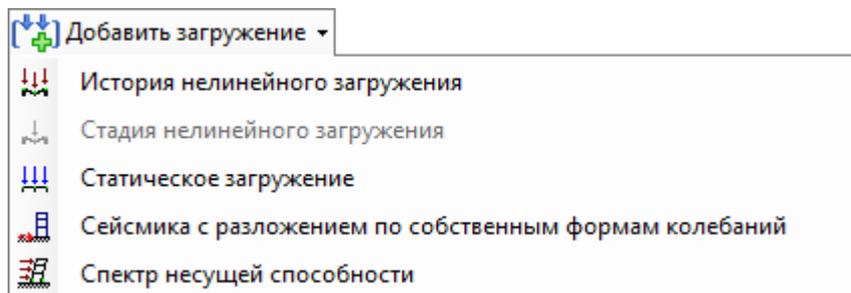


Рис. 12.1. Раскрывающийся список **Добавить нагружение**

Первые три типа нагружений служат инструментами моделирования статических воздействий на сооружение или конструкцию.

На данный момент в ПК ЛИРА 10.12 возможно провести нелинейный статический анализ по четырем расчетным модулям:

- модуль 27 — сейсмическое воздействие по однокомпонентной акселерограмме;
- модуль 36 — сейсмическое воздействие по ДБН В.1.1-12:2014 с изменениями от 01.05.2019 (Украина);
- модуль 44 — сейсмическое воздействие по EN 1998-1:2004 (Eurocode 8);
- модуль 55 — сейсмическое воздействие по СТО НИУ МГСУ 2015 (Российская Федерация).

Задание нелинейных нагружений, статического нагружения или сейсмического воздействия ничем не отличаются от обычной статической нелинейной задачи или статической задачи с расчетом на сейсмическое воздействие. После моделирования воздействий на сооружение или конструкцию следует задать параметры нелинейного статического расчета.

При выборе типа нагружения **Спектр несущей способности** задаются следующие параметры, представленные в виде трех блоков в окне редактора нагружений: **Параметры нагружения**, **Параметры выполнения расчета** и **Параметры прекращения расчета**.

Блок **Параметры нагружения** (рис. 12.2) разбит на два раздела, каждый из которых дает возможность выбрать определенный вид нагружения, которое будет служить исходным для построения спектра несущей способности. Раздел **Предшествующая история** является обязательным для нагружения **Спектр несущей способности** и служит инструментом для выбора истории нелинейного нагружения, которая будет отображать статические воздействия на конструкцию. Также в этом разделе можно задать коэффициент, с которым статическое нагружение будет учтено в нелинейном статическом анализе. Раздел **Сейсмическое нагружение** является инструментом для выбора сейсмического воздействия, которое будет учтено в pushover-анализе. Здесь также присутствуют поля для ввода номера формы колебания, которая будет использоваться для анализа, и коэффициента, с которым будут учтены инерционные силы.

Параметры загрузки	
<input checked="" type="checkbox"/> Предшествующая история	<input checked="" type="checkbox"/> Сейсмическое нагружение
<input type="checkbox"/> 1. История нелинейного нагружения <input checked="" type="checkbox"/> 2. Сеймика с разложением по собственным формам колебаний	Номер учитываемой формы собственных колебаний (0-для формы с максимальным модальным вкладом, 1-для сдвигающей силы в основании) 0 Коэффициент к инерционным силам по выбранной форме собственных колебаний 1

Рис. 12.2. Параметры загрузки

 В ПК ЛИРА 10 нелинейный статический анализ производится с учетом только одной формы колебаний. Обычно в качестве расчетной формы колебаний берут первую форму. Но для правильного выбора формы нужно сначала провести модальный анализ и выбрать форму с наибольшим вкладом модальных масс.

Блок **Параметры выполнения расчета** (рис. 12.3) содержит поля для задания параметров выполнения нелинейного расчета, а именно:

- Стартовый шаг;
- Минимальное количество итераций для физически нелинейных итерационных элементов;
- Допускаемая погрешность в выборе шага;
- Шаг сохранения результатов.

Параметры выполнения расчета		
<input type="checkbox"/> Обнулить перемещения	Минимальное количество итераций для физически нелинейных итерационных элементов	
	1000	
Стартовый шаг	Допускаемая погрешность в выборе шага	Шаг сохранения результатов
1E-05	1E-05	0.1

Рис. 12.3. Параметры выполнения расчета

Блок **Параметры прекращения расчета** (рис. 12.4) включает поля для ввода следующих параметров:

- Номер контролируемого узла;
- Предельное значение суммарного перемещения;
- Предельный коэффициент к нагружению.

Параметры прекращения расчета		
Номер контролируемого узла	Предельное значение суммарного перемещения	Предельный коэффициент к нагружению
1	200 мм	10

Рис. 12.4. Параметры прекращения расчета

В поле **Номер контролируемого узла** следует вводить узел, который принадлежит верхнему уровню здания или сооружения. Стоит отметить, что при расчете по 44-му модулю

спектр несущей способности будет строиться именно для указанного узла. В то же время, метод N2, который реализован в Eurocode 8, был создан с расчетом на то, что в качестве контролируемого узла будет выбран узел с верхнего уровня здания.

В поле **Предельное значение суммарного перемещения** вводится величина суммарного перемещения контролируемого узла, при достижении которой расчет будет прекращен. Суть характеристического метода проектирования заключается в доведении конструкции до разрушения. Поэтому, традиционно, задают перемещение, при котором конструкция должна разрушиться.

В поле **Предельный коэффициент к загрузению** задается коэффициент, с которым учитываются загрузки в нелинейном статическом анализе, — по достижении его расчет прекращается.

 Если в качестве контролируемого узла при расчете по 44-му расчетному модулю выбран узел, у которого ограничены все степени свободы, то при попытке расчета будет получена ошибка.

12.2 РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА

Для просмотра стандартных результатов (перемещения узлов, усилия в элементах и т.д.) для загрузки **Спектр несущей способности** воспользуйтесь инструментами визуализации или таблицами (см. п. 3.3). С помощью вкладки ленты или команды меню

Спец. результаты ⇨ **Спектр несущей способности** (либо кнопки  на панели инструментов) доступны для просмотра в виде графиков характерные результаты нелинейной статической процедуры. Эти же результаты можно вывести и в табличном виде. Также с помощью режима **Таблицы результатов** можно вывести таблицу **Результаты по Pushover**, в которой собраны сводные результаты по загрузению.

Как упоминалось ранее, нелинейный статический анализ в ПК ЛИРА 10.12 возможно провести по четырем расчетным модулям. Поскольку в расчетные модули заложены разные алгоритмы по разным нормативным документам, виды результатов расчета по различным модулям немного отличаются.

12.2.1 Расчет по 27-му расчетному модулю

При расчете по однокомпонентной акселерограмме расчет производится следующим образом:

1. Многомассовая расчетная схема приводится к эквивалентной одномассовой.
2. Выполняется построение спектров несущей способности (СНС) в координатах «спектральное ускорение S_a – спектральное перемещение S_d » и «сдвигающая сила F_{OCH} – перемещение S_d », а также выполняется их идеализация в билинейном представлении.

3. Выполняется процесс интегрирования ЭОМС на заданную акселерограмму.

В результате расчета получены следующие результаты (рис. 12.5):

- СНС S_a-S_d — спектр несущей способности (СНС) ЭОМС в координатах «спектральное ускорение S_a – спектральное перемещение S_d » и его билинейное представление;

- СНС $F_{OCH} - S_d$ — СНС ЭОМС в координатах «сдвигающая сила F_{OCH} — перемещение S_d » и его билинейное представление;
- $M - d$ — изменение массы ЭОМС по шагам нелинейного нагружения;
- $W - d$ — изменение частоты ЭОМС по шагам нелинейного нагружения;
- $P - d$ — изменение периода ЭОМС по шагам нелинейного нагружения;
- $USa - P$ — упругий спектр реакции ускорений акселерограммы для 5% затухания;
- $USv - P$ — упругий спектр реакции скоростей акселерограммы для 5% затухания;
- $USd - P$ — упругий спектр реакции перемещений акселерограммы для 5% затухания;
- $USa - USd$ — упругий псевдоспектр реакции ускорений в координатах «ускорения US_a — перемещения US_d »;
- $a - t$ — упругие и неупругие ускорения ЭОМС в динамике во времени на заданную акселерограмму землетрясения;
- $v - t$ — упругие и неупругие скорости ЭОМС в динамике во времени на заданную акселерограмму землетрясения;
- $d - t$ — упругие и неупругие перемещения ЭОМС в динамике во времени на заданную акселерограмму землетрясения;
- $F - t$ — упругие и неупругие восстанавливающие силы ЭОМС в динамике во времени на заданную акселерограмму землетрясения.

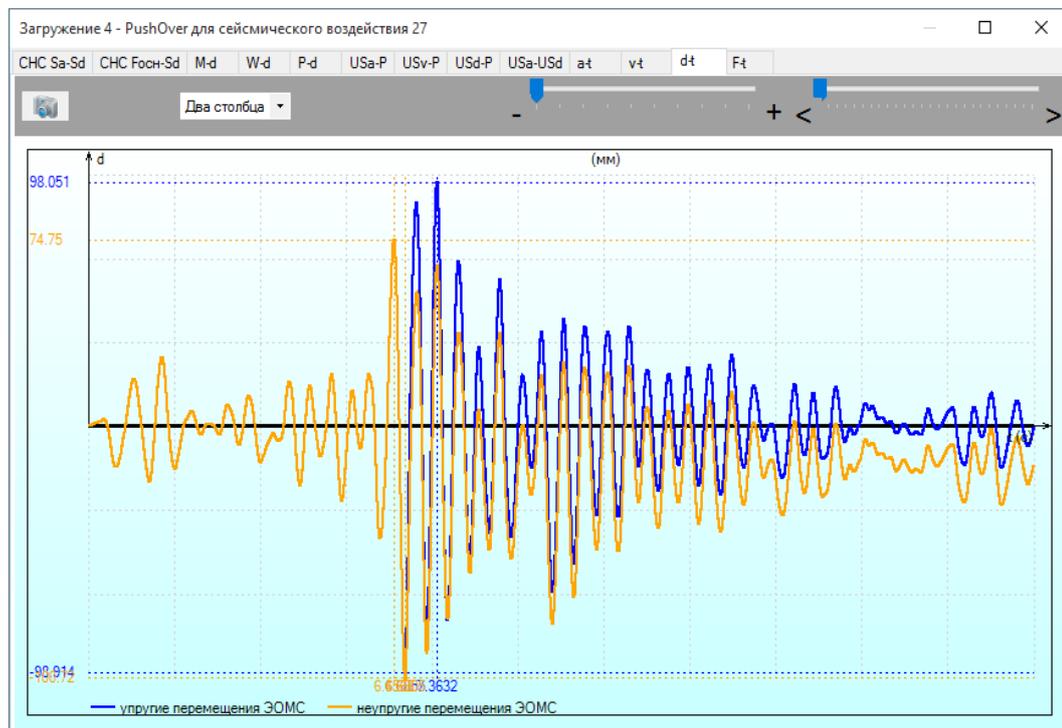


Рис. 12.5. Результаты по Pushover для 27-го модуля

12.2.2 Расчет по 36-му расчетному модулю

При расчете по ДБН В.1.1-12:2014 (Украина) выполняется линейный спектральный расчет МРМ и построение СНС для МРМ в координатах «спектральное ускорение S_a —

спектральное перемещение S_d » с его билинейной идеализацией. Затем выполняется построение СНС для ЭОМС в координатах «сдвигающая сила F_{OCH} – перемещение S_d » и проводится его билинейная идеализация. Результатом нелинейного статического расчета ЭОМС являются перемещения в МРМ (максимальное и отвечающее границе текучести, идеализированной МРМ). Зависимость между этими перемещениями выражается коэффициентом податливости μ . Следующим шагом расчета является нахождение коэффициента редукции R_{μ} , который зависит от коэффициента податливости и периода колебаний здания. На завершающем этапе строится проектный спектр реакции с вычислением целевого перемещения.

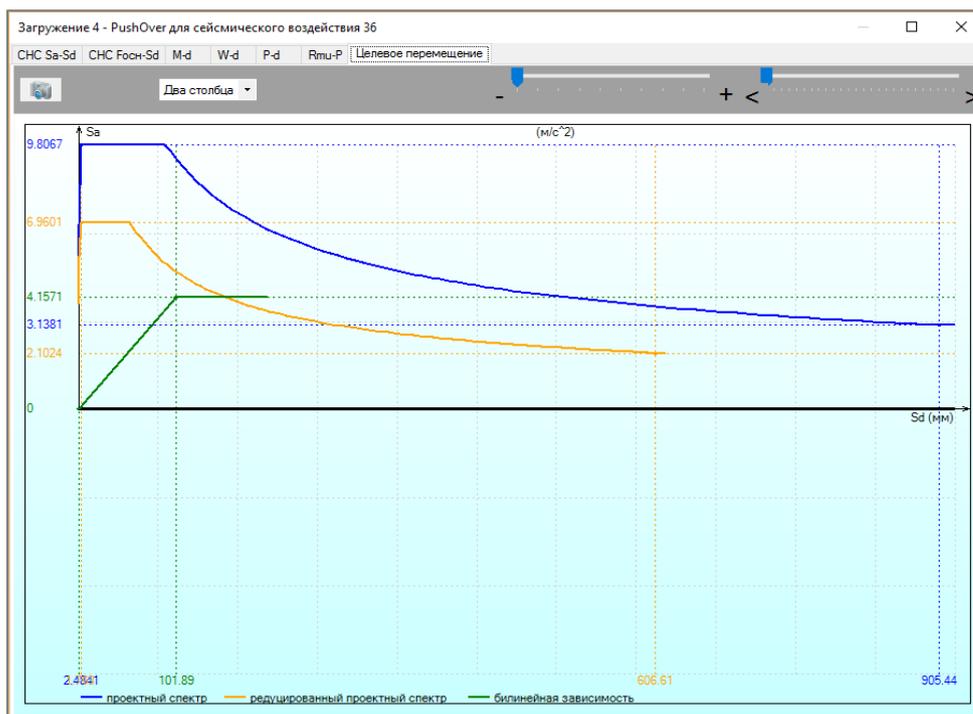


Рис. 12.6. Результаты по Pushover для 36-го модуля

В результате расчета получены следующие результаты (рис. 12.6):

- СНС $S_a - S_d$ — спектр несущей способности (СНС) МРМ в координатах «спектральное ускорение S_a – спектральное перемещение S_d » и его билинейное представление;
- СНС $F_{OCH} - S_d$ — СНС ЭОМС в координатах «сдвигающая сила F_{OCH} – перемещение S_d » и его билинейное представление;
- $M - d$ — изменение массы ЭОМС по шагам нелинейного нагружения;
- $W - d$ — изменение частоты ЭОМС по шагам нелинейного нагружения;
- $P - d$ — изменение периода ЭОМС по шагам нелинейного нагружения;
- $R_{\mu} - P$ — изменение коэффициента редукции ЭОМС по шагам нелинейного нагружения;
- Целевое перемещение — в координатах «спектральное ускорение S_a – спектральное перемещение S_d » построены: проектный спектр реакции, редуцированный проектный спектр реакции и билинейная зависимость.

12.2.3 Расчет по 44-му расчетному модулю

Характерным отличием расчета по EN 1998-1:2004 (Eurocode 8) является то, что результаты напрямую зависят от выбора контрольного узла. Для других расчетных модулей контрольный узел служит, собственно, лишь инструментом для прекращения расчета по достижении его заданного контрольного перемещения. В то же время, для 44-го модуля спектр несущей способности строится для контрольного узла. Поэтому следует выбирать узел в верхнем уровне сооружения, поскольку это условие заложено в нелинейный статический метод, который реализован в EN 1998-1:2004 (Eurocode 8). Алгоритм данного расчета следующий:

1. МРМ заменяется на ЭОМС.
2. Вычисляется коэффициент преобразования Γ .
3. После деления значения перемещения в контрольном узле и сдвигающей силы в основании МРМ на коэффициент преобразования строится спектр несущей способности ЭОМС.
4. Происходит идеализация СНС ЭОМС и вычисление предела текучести ЭОМС.
5. Происходит вычисление периода колебаний идеализированной ЭОМС.
6. Вычисляется целевое перемещение и строится проектный спектр реакции.

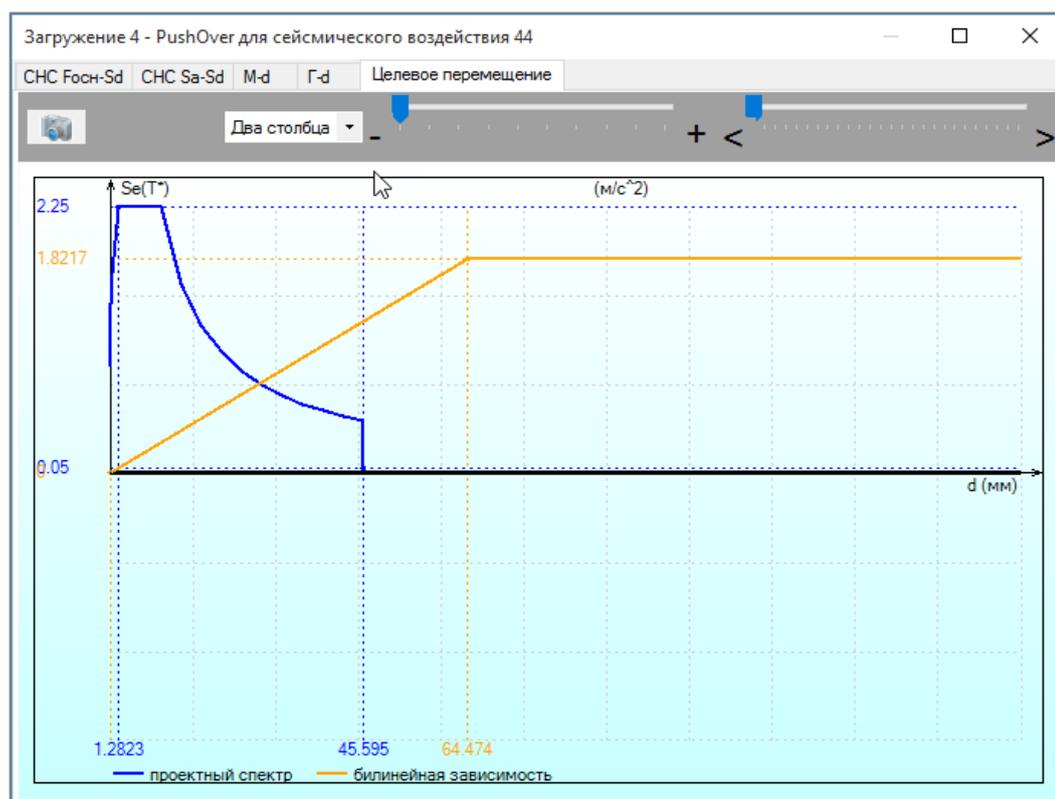


Рис. 12.7. Результаты по Pushover для 44-го модуля

В результате расчета получены следующие результаты (рис. 12.7):

- СНС $F_{OCH} - S_d$ — СНС в координатах «сдвигающая сила F_{OCH} – перемещение S_d »;
- СНС $S_a - S_d$ — спектр несущей способности (СНС) в координатах «спектральное ускорение S_a – спектральное перемещение S_d » и его билинейное представление;
- $M - d$ — изменение массы ЭОМС по шагам нелинейного нагружения;

- $\Gamma-d$ — изменение коэффициента преобразования ЭОМС по шагам нелинейного нагружения;
- Целевое перемещение — в координатах «упругое ускорение $S_e(T^*)$ – перемещение d » построены: проектный спектр реакции и билинейная зависимость.

12.2.4 Расчет по 55-му расчетному модулю

При расчете по стандарту организации МГСУ (Российская Федерация) статическая нелинейная процедура выполняется по следующему алгоритму:

1. Выполняется построение спектра несущей способности многомассовой расчетной модели в координатах «спектральное ускорение S_a – спектральное перемещение S_d » и его билинейная идеализация.

2. Выполняется построение проектного спектра «сейсмического требования».

3. Вычисляются максимальные перемещения и коэффициент податливости.

В результате расчета в координатах «спектральное ускорение S_a – спектральное перемещение S_d » выполняется построение (рис. 12.8):

- спектра несущей способности многомассовой расчетной модели и его билинейного представления;
- проектного спектра;
- графика разрушения первого элемента, с вычислением точек его пересечения с СНС и проектным спектром.

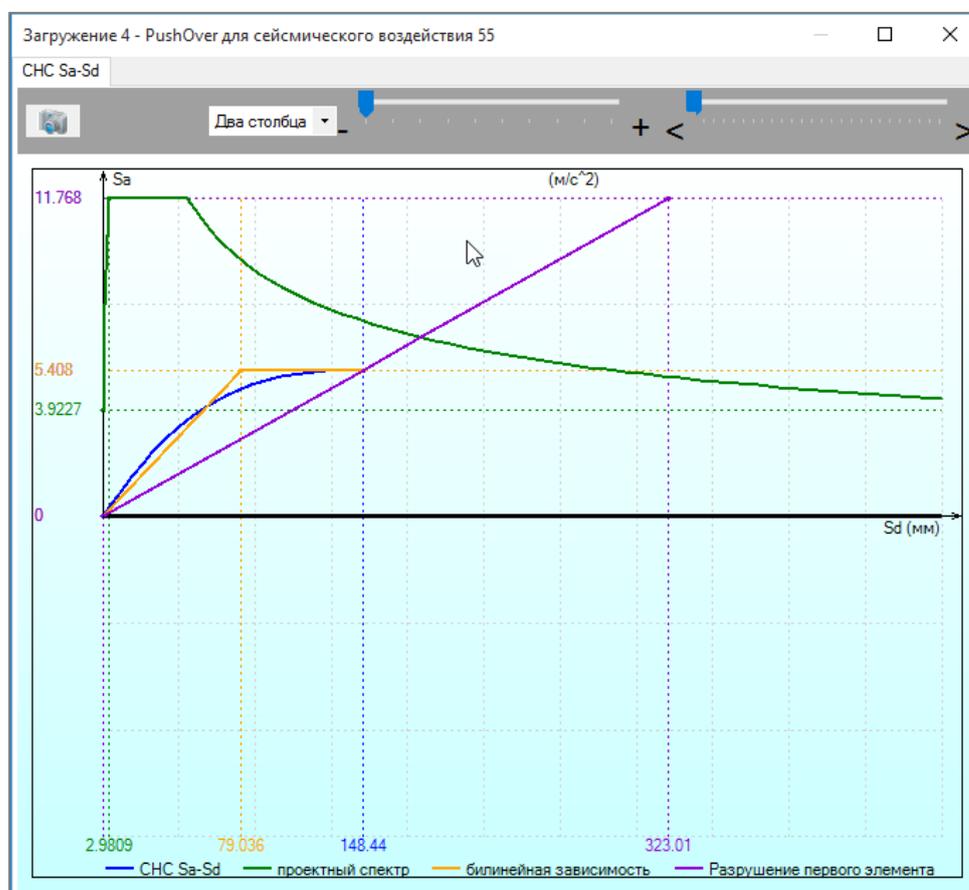


Рис. 12.8. Результаты по Pushover для 55-го модуля