

УДК 624.041. 2

СТРОИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА

Э. Е. Хачиян, М. Г. Мелкумян

**Методика получения динамической зависимости  
 «восстанавливающая сила—перемещение»**

(Представлено академиком АН Армянской ССР А. Г. Назаровым 21/X 1981)

Одним из актуальных вопросов в теории сейсмостойкости является задача определения динамической восстанавливающей силы в зависимости от горизонтальных смещений конструкций. При расчете зданий на сейсмическое воздействие характеристику восстанавливающей силы обычно принимают или как линейную функцию от деформации, или основываясь на данных статических испытаний отдельных конструктивных элементов—балок, колонн, стен, рам и др. Однако известно, что закономерности динамического нагружения, каким является сейсмическое воздействие, существенно отличаются от статического, особенно для строительных конструкций. Кроме того, характеристику восстанавливающих сил необходимо иметь в отдельности для каждого этажа здания с учетом влияния всех несущих и ненесущих элементов конструкций, податливости узлов сопряжения, переменного вертикального обжатия, чтобы более точно построить расчетную схему и ближе подойти к действительному поведению сооружения.

Сложность определения динамической восстанавливающей силы при реальном землетрясении обусловлена необходимостью регистрации одновременно по всей высоте здания величин, характеризующих положение конструкций и действующих на них инерционных сил в любой момент времени на протяжении всего колебательного процесса.

В настоящей статье сделана, по-видимому, первая попытка экспериментального получения динамической зависимости «восстанавливающая сила—перемещение» при динамических испытаниях зданий с использованием вибрационных машин инерционного действия.

Рассмотрим многоэтажное здание, расчетную схему которого, как обычно принято в расчетах на сейсмическое воздействие, представим в виде вертикального бруса с дискретными массами, сосредоточенными в уровнях междуэтажных перекрытий. Как показывают многочисленные данные экспериментальных исследований, проведенных у нас в стране и за рубежом, в зданиях при колебаниях перекрытия перемещаются параллельно друг другу только в горизонтальных плоскостях. В этом случае восстанавливающая сила для любого этажа будет обусловлена разностью перемещений этого и смежного нижнего этажа, т. е. динамическим перекосом яруса. Поэтому для получения динамической зависимости «восстанавливающая сила—перемещение» целе-

сообразно исследовать непосредственно изменение во времени деформированного состояния конструкции при колебаниях, возбуждаемых вибрационной машиной инерционного действия, установленной на перекрытии верхнего этажа изучаемой системы. Дифференциальные уравнения движения, полученные в (1) для принятой расчетной схемы, представим в следующем виде:

$$Q_k(t) + R_k(y_k - y_{k-1}) + C_k(y_k - y_{k-1}) = P(t), \quad k=1, 2, \dots, n, \quad (1)$$

где  $Q_k(t) = \sum_{i=k}^n m_i y_i$  — поперечная инерционная сила на уровне  $K$ -го этажа;  $m_k$ ,  $y_k$ ,  $y_k$  — соответственно масса, перемещение и ускорение  $K$ -го этажа;  $R_k$ ,  $C_k$  — соответственно неизвестные восстанавливающая сила и сила внутреннего трения  $K$ -го этажа;  $P(t)$  — возмущающая сила вибратора.

Наиболее полное описание характеристики восстанавливающей силы возможно при развитии в изучаемой конструкции неупругих деформаций с дальнейшим доведением ее до разрушения. При вибрационных испытаниях этого можно добиться, вводя конструкцию в резонанс, что приводит к образованию значительных инерционных нагрузок с резким увеличением перемещений и ускорений (2). Весь процесс деформирования вплоть до разрушения конструкции реализуется путем поэтапных резонансных испытаний с увеличением на каждом этапе веса внецентренных грузов на валах вибрационной машины.

Опыт натурных испытаний зданий резонансным методом при действии мощных вибрационных машин показывает, что величины возбуждаемых ими внешних сил  $P(t)$  не превышают 5% от возникаемых в зданиях величин поперечных инерционных сил  $Q(t)$  даже на том уровне (в данном случае верха здания), где закреплена машина, не говоря уже об остальных этажах, где по сравнению с поперечными силами их величины ничтожно малы\*. Принимая это во внимание, можно считать, что поперечная инерционная сила на уровне данного этажа при резонансе практически уравновешивается восстанавливающей силой и силой внутреннего трения. Ввиду сложности разделения последних (а в некоторых случаях их разделение, по-видимому, не является необходимым), сумму этих сил назовем общей динамической восстанавливающей силой и обозначим через  $R_k^0(t)$ . Следовательно, для ее экспериментального определения на данном этаже нужно в любой момент времени определить величину инерционной поперечной силы  $Q_k(t)$

$$R_k^0(t) = -Q_k(t). \quad (2)$$

Таким образом, для экспериментального получения динамической зависимости «восстанавливающая сила—перемещение» при динамических испытаниях с помощью вибрационной машины необходимо осуществлять одновременную запись ускорений и перемещений на уровне всех перекрытий. По полученным результатам для данного момента времени, зная массу каждого этажа, определяются действующие по высоте здания инерционные силы и соответствующие перемещения. Затем вычисляются поперечные силы и динамические перекосы на каждом этаже. Если на осцилограммах выделить отрезок времени,

\* При необходимости силу  $P(t)$  можно учесть исходя из уравнения (1).

соответствующий одному полному колебанию, и разделить его с определенным шагом на равные промежутки времени, то, выполняя указанные вычисления для каждого момента времени, можно построить гистерезисную кривую, характеризующую динамическую зависимость восстанавливающей силы данного этажа от его перекоса при данном уровне динамического нагружения. Семейство таких кривых, полученных при испытаниях вплоть до разрушения конструкции, позволит описать полную картину динамического деформирования по высоте здания.

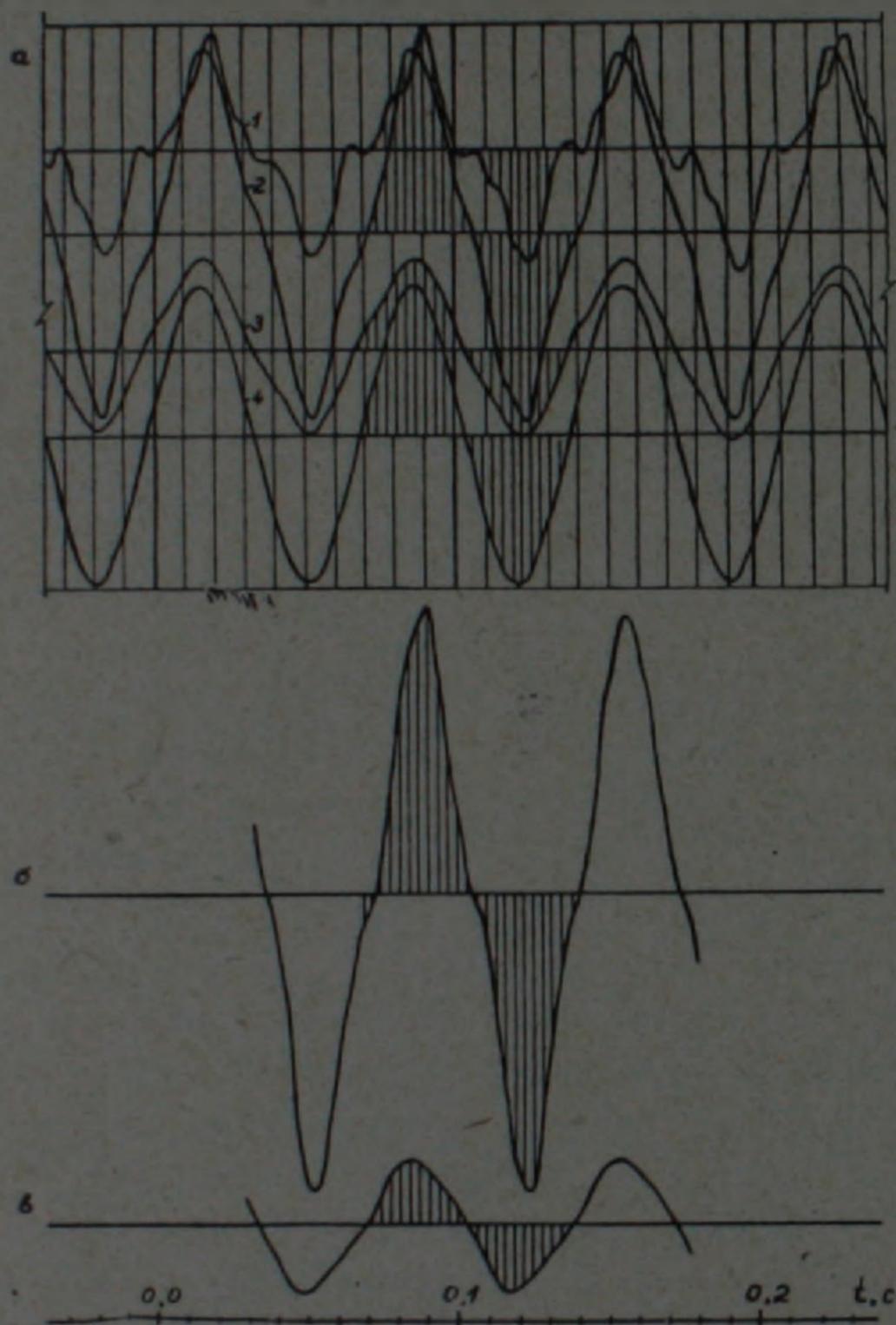


Рис. 1. К методике определения динамической восстанавливающей силы: а—участок осциллограммы, полученной при динамических испытаниях модели; б—поперечная сила на уровне первого этажа, построенная по записям 1, 2; в—динамический перекос второго этажа, построенный по записям 3, 4; 1, 2—запись ускорений на уровне перекрытий соответственно первого и второго этажей; 3, 4—запись перемещений на уровне перекрытий соответственно первого и второго этажей

Предлагаемая методика была апробирована при испытании двухэтажной пространственной железобетонной модели здания со связевым каркасом, выполненной в масштабе 1/5 с соблюдением принципов простого подобия<sup>(3)</sup>. На рис. 1 приведен участок осциллограммы с за-

тысячи ускорений и перемещений первого и второго этажей модели. Отрезок времени, соответствующий одному полному колебанию, разделен на 22 равные части с шагом 0,0033 сек. Определяя по этой записи на каждом шаге величины инерционных сил и перемещений и далее—поперечных сил и перекосов, были построены графики работы первого и второго этажей при данном уровне динамического нагружения. Выполняя аналогичные операции на каждом этапе нагружения до разрушения модели, получены графики, иллюстрирующие динамические зависимости «восстанавливающая сила—перемещение» для первого и второго этажей, которые приведены соответственно на рис. 2 и 3.

Таким образом, предлагаемая методика дает возможность интегрально, с учетом сил внутреннего трения, конструкционного трения в узлах и стыках, влияния как несущих, так и ненесущих элементов

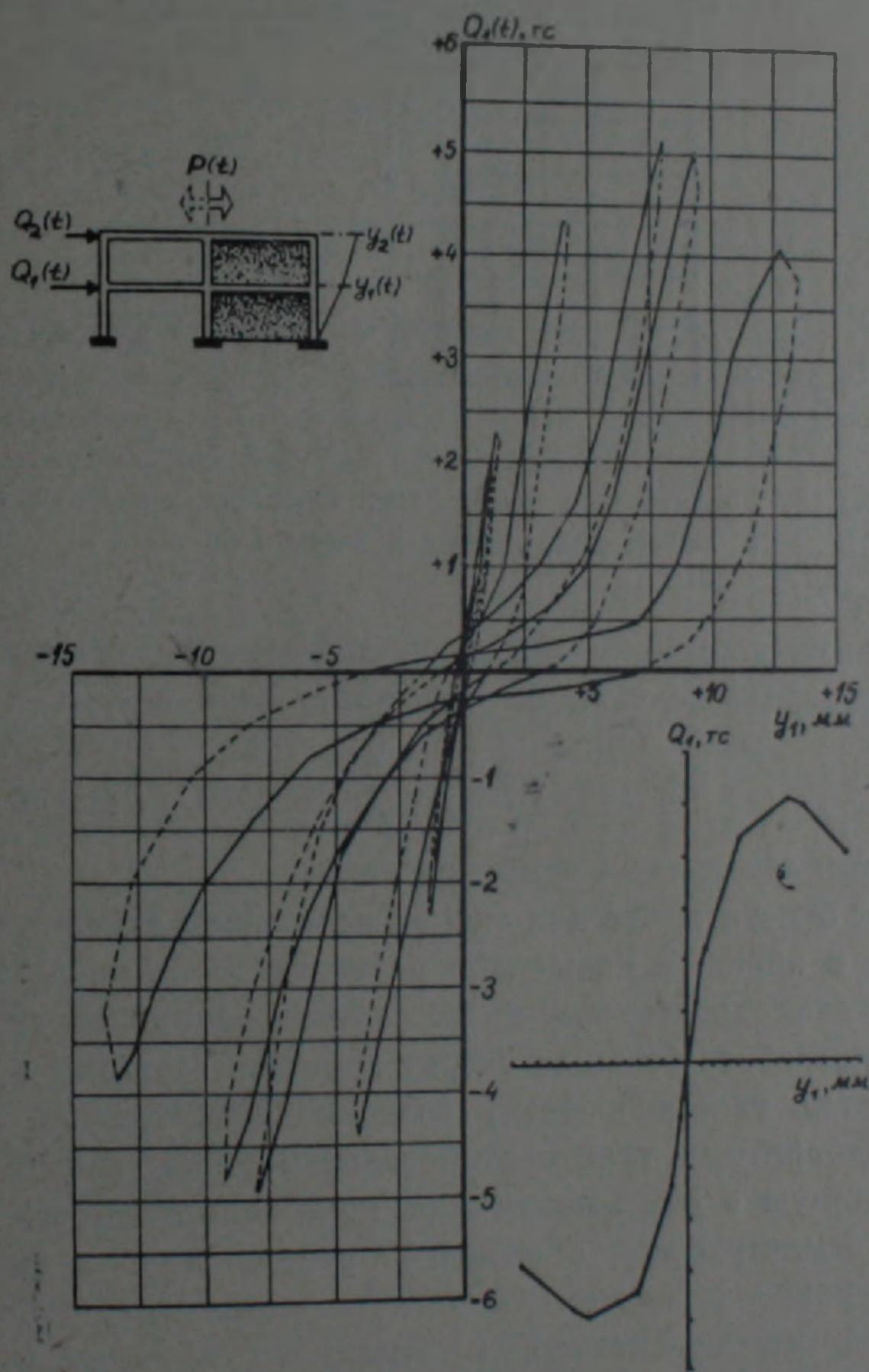


Рис. 2. Динамическая зависимость «восстанавливающая сила—перемещение» для первого этажа

конструкций в целом, определять характеристику динамической восстанавливающей силы. Отметим, что по этой методике можно выявить картину динамического деформирования по высоте различных типов

зданий непосредственно во время землетрясений, используя станции инженерно-сейсмометрической службы. Выдаваемая ими информация о величинах перемещений и ускорений грунта и всех этажей здания и их изменении во времени на протяжении действия землетрясения по-

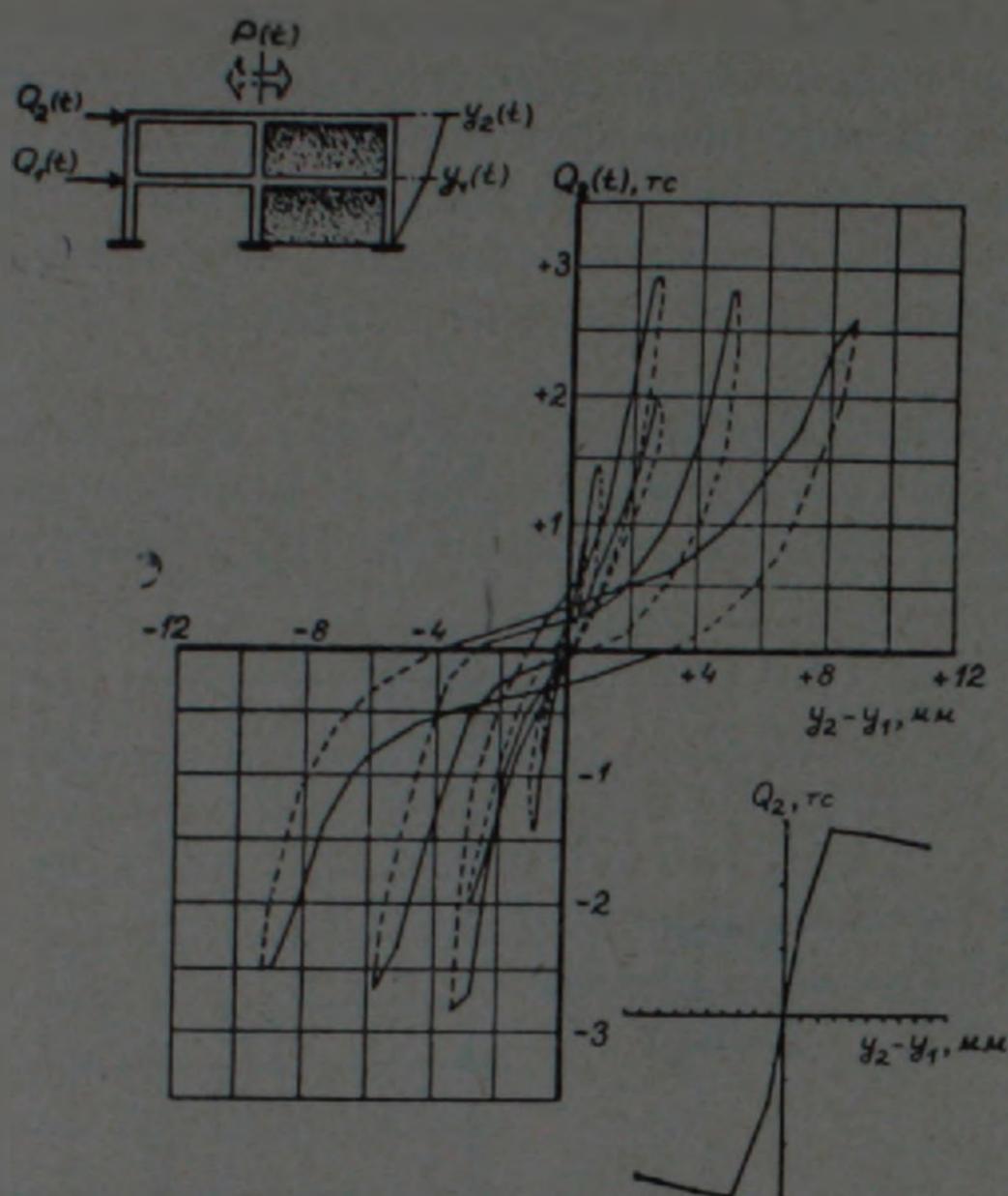


Рис. 3. Динамическая зависимость «восстанавливающая сила—перемещение» для второго этажа

зволит по вышеописанной методике определять зависимости  $R_k^0(y_k - y_{k-1})$ , исходя из следующего уравнения равновесия:

$$R_k^0(t) = -Q_k(t) - \sum_{i=k}^n m_i \ddot{y}_0(t), \quad (3)$$

где  $\ddot{y}_0(t)$  — акселерограмма землетрясения.

Следует отметить, что для зданий небольшой этажности обработка полученных в процессе испытаний результатов не представляет больших затруднений. Однако для многоэтажных зданий обработка результатов уже потребует больших затрат времени. Поэтому в дальнейшем представляется целесообразным создание электронных устройств в виде малогабаритных транспортабельных блоков, способных обрабатывать вводимую в них информацию непосредственно во время испытаний или землетрясения с выдачей результатов в виде таблиц и готовых графиков, а также создание аппаратуры, регистрирующей динамические перекосы этажей\* и суммарные ускорения в процессе колебания здания.

Научно-исследовательский институт  
строительства и архитектуры  
Госстроя Армянской ССР

\* Идея создания аппаратуры для регистрации динамического перекоса этажа была высказана А. Г. Назаровым.

«Վերականգնող ուժ—տեղափոխություն» դինամիկ կախվածության ստացման մեթոդիկան

Հոդվածում շարադրված է շենքերի և կառուցվածքների դինամիկ փորձարկումների արդյունքներով «վերականգնող ուժ—տեղափոխություն» դինամիկ կախվածության ստացման մեթոդիկան:

Ներկայումս օգտագործվող կախվածությունները, որպես կանոն, ստացված են շենքերի առանձին կոնստրուկտիվ էլեմենտների և մասերի ստատիկ փորձարկումներով: Բայց ստատիկ և դինամիկ բեռնավորումների որակական տարբերությունների հետևանքով այդ կախվածությունները չեն արտահայտում կոնստրուկցիաների իրական վարքը սեյսմիկ ազդեցությունների դեպքում:

Առաջարկվող մեթոդիկան թույլ կտա ստանալ վերականգնող ուժի բնութագիրը հետազոտվող շենքի յուրաքանչյուր հարկի համար, ինչպես դինամիկ փորձարկումների, այնպես էլ երկրաշարժերի ժամանակ: Այս դեպքում գումարային ձևով հաշվի է առնվում կոնստրուկցիաների կրող և ոչ կրող էլեմենտների և ներքին շփման ուժերի ազդեցությունը սիստեմի ամբողջ աշխատանքի վրա:

ЛИТЕРАТУРА — ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅՈՒՆ

- <sup>1</sup> Э. Е. Хачиян, Сейсмические воздействия на высокие здания. Айастан, Ереван, 1973. <sup>2</sup> Г. А. Шапиро и др., Вибрационные испытания зданий, Стройиздат, М., 1972. <sup>3</sup> А. Г. Назаров, О механическом подобии твердых деформируемых тел (к теории моделирования), Изд. АН АрмССР, Ереван, 1965.