

опытных балок по СНиП 2.03.01.-84 как для элементов без поперечной арматуры (графа 7) и по зависимостям, приведенным в нормах в общем виде (графа 9), а также по методике [6] с учётом нагельного эффекта арматуры (графа 11) и по предложениям проекта норм СНБ 5.03.01-98, основанных на нормативных документах PrPN-B-03264 и DIN1045-1.[7] (графа 13). Расчётные значения несущей способности наклонных сечений подсчитаны при значении «С», принятым равным пролёту среза, с использованием реальных прочностных характеристик бетона  $R_{bt}$  и расчётного сопротивления отогнутой арматуры  $R_s = \sigma_{b2}$ . Данные опытов [5] подтверждают интенсивность возрастания напряжений в отогнутой арматуре, начиная со стадий загрузки соответствующих образованию наклонных трещин.

Значения несущей способности наклонных сечений по поперечной силе, подсчитанные по зависимостям, приведенным в проекте СНБ 5.03.01-98, являются приемлемыми только для балок с прямолинейной арматурой и, вероятно, при больших углах наклона отгибов. Наиболее близко к результатам экспериментов оценивается прочность наклонных сечений балок с полого отогнутой арматурой и при отсутствии или малом коэффициенте поперечного армирования по условию, представленному в СНиП 2.03.01-84 в виде  $Q \leq Q_b + Q_{sw} + Q_{s.inc}$  с учётом реальных прочностных характеристик бетона  $R_{bt}$  и арматуры  $R_s$ .

#### ВЫВОДЫ

При оценке несущей способности наклонных сечений балок без ортогональной поперечной арматуры или при минимальном количестве её, соответствующей условию  $q_{sw} < q_{sw.min}$ , на действие поперечных сил следует учитывать усилие в бетоне, определяемое по СНиП 2.03.01.-85, усилие в хомутах, а также вертикальную составляющую в отгибах.

УДК 691.620.1

**Никитин В.И.**

## ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ

Элементы зданий и сооружений, подвергающиеся непосредственному воздействию окружающей среды, нуждаются в довольно частых текущих и капитальных ремонтах. Наиболее короткие сроки службы характерны для защитно-отделочных слоев, кровель и других конструктивных элементов зданий. В результате эксплуатация зданий сопровождается чередой мелких и крупных ремонтов. Поэтому прогнозирование долговечности используемых в конструкциях строительных материалов для планирования последующих ремонтов является важной и достаточно сложной проблемой.

### 1. ПОДХОДЫ К РЕШЕНИЮ ЗАДАЧИ

Задачи прогноза могут решаться на основе математических моделей, построенных с использованием структурного (теоретического) или эмпирического подходов. Структурный подход предполагает раскрытие схемы механизма процесса деградации материала в реальных условиях. Действующие на молекулярном уровне механизмы деградации изменяются в зависимости от вида материала и условий окружающей среды. Применительно к материалам ограждающих конструкций основная деградация происходит вследствие совместного действия температуры и влаги, гидrolитического и радиаци-

онного повреждения. Поэтому в схеме процесса деградации должны содержаться представления о взаимном влиянии переноса тепла, вещества и химизма соответствующих реакций.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Леонгардт Ф. Предварительно напряжённый железобетон. – М.: Стройиздат 1983.
2. Михайлов В.В. Предварительно напряжённые железобетонные конструкции: Теория, расчёт и подбор сечений. – М.: Стройиздат 1978.
3. Сасонко Л.В. Исследование изгибаемых предварительно напряжённых конструкций с отогнутой арматурой: Автореф. дис. на соиск. учёной степени канд. техн. наук. – М., 1974.
4. Чупак И.М. Работа железобетонных балок с отогнутой преднапрягаемой арматурой// Совершенствование строительных конструкций и строительного производства. – Кишинёв: Штиинца. – 1984.
5. Рочняк О.А., Малиновский В.Н. Прочность балок с отогнутой стержневой арматурой при действии поперечных сил// Бетон и железобетон. – 1985. – N5. с. 33-34.
6. Малиновский В.Н., Зинов К.А. Расчёт прочности железобетонных элементов по наклонному сечению на действие поперечной силы с учётом нагельного эффекта в арматуре// Современные строительные конструкции. Проблемы и перспективы: Сб. трудов. – Брест: БрПИ, 1995, - с. 28-32.
7. Кондратчик Н.И., Кондратчик А.А. О методике расчёта наклонных сечений, предусмотренной в проекте СНБ 5.03.01-98// «Вестник БПИ – Строительство и архитектура» N1, 2000 с. 29-32.

онного повреждения. Поэтому в схеме процесса деградации должны содержаться представления о взаимном влиянии переноса тепла, вещества и химизма соответствующих реакций.

Если такую схему записать на языке математики, то получается некая математическая модель (обычно в виде системы уравнений), в которую первоначально входят неизвестные параметры (коэффициенты). Для определения этих параметров на физических моделях или оригинале ставят эксперимент, результаты которого позволяют получить окончательную модель, используемую в целях прогноза.

Для большинства строительных материалов прогнозирование их долговечности в реальных условиях на основе математических моделей, полученных с помощью структурного подхода, представляет пока значительную сложность. Поэтому при построении математических моделей для прогнозирования часто целесообразно использовать эмпирический подход. Эмпирические модели строятся по результатам испытаний физических моделей изучаемого объекта обычно в лабораторных условиях, которые в какой-то мере имитируют реальные условия. При выполнении таких довольно длительных и трудоемких испытаний много условностей, связанных с несовершенством методик лабораторных экспериментов,

*Никитин Вадим Иванович. К.т.н., профессор каф. строительной механики Брестского государственного технического университета.*

*Беларусь, БГТУ, 224017, г. Брест, ул. Московская 267.*

предполагающих использование небольших (стандартных) образцов материалов. Поэтому ожидать высокой точности прогнозирования не приходится.

С целью повышения достоверности оценок физического моделирования целесообразно применять аппарат теории подобия, позволяющий в ряде случаев построить критерии подобия, в которые входят физические величины, характеризующие изучаемый процесс. На основе этих критериев становится возможным количественный переход от результатов испытаний лабораторных образцов (моделей) к интересующим нас параметрам реального объекта.

В рассматриваемом случае критерии подобия можно установить путем анализа физических размерностей величин, входящих в дифференциальное уравнение Фурье, которое в обобщающем смысле является уравнением нестационарного поля любого потенциала переноса.

Например, если при изучении одномерного изотермического процесса перемещения влаги в капиллярно-пористом материале за потенциал переноса принять влагосодержание материала, то дифференциальное уравнение теплопроводности имеет вид:

$$\frac{\partial w}{\partial t} = a_m \frac{\partial^2 w}{\partial x^2}, \quad (1)$$

где  $w$  – влагосодержание;  $t$  – временная координата;  $x$  – пространственная координата;  $a_m$  – коэффициент нестационарной теплопроводности, зависящий от природы материала и его влажностного состояния.

Из уравнения (1) приходим к важному гомометрическому критерию Фурье  $F_0'$

$$F_0' = a_m' t / l^2, \quad (2)$$

где  $a_m'$  – усредненный коэффициент нестационарной теплопроводности;  $l$  – характерный размер конструкции, равный наибольшему расстоянию, на которое необходимо переместиться влаге внутри ограждения для того, чтобы достигнуть поверхности испарения.

Усреднение значения коэффициента  $a_m$  связано с тем, что он сильно меняется на различных стадиях увлажнения и сушки ограждающей конструкции.

Можно говорить о сопоставимых сроках естественной сушки (почти изотермические условия) сравниваемых конструкций при равенстве гомометрических критериев Фурье, если начальная влажность материала и условия влагообмена на поверхностях этих конструкций одинаковы.

Приняв в (2)  $F_0' = 1$ , получим

$$t = l^2 / a_m'. \quad (3)$$

Очевидно, что оценка, полученная с помощью (3), является весьма приближенной, так как не учитываются колебания температуры и влажности окружающей среды, характер распределения влаги по толще конструкции и ее начальное содержание. Кроме того, с большой погрешностью на модели и натуре определяется характерный размер  $l$ , особенно для слоистых конструкций из разнородных материалов.

Таким образом, физическое моделирование на основе критериев подобия при решении задачи прогнозирования может приводить к большим погрешностям. Попытаемся разобраться с погрешностями физического моделирования, опираясь на рекомендации работы /2/.

## 2. ПОГРЕШНОСТИ ФИЗИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Изготовление физической модели и натуре всегда выполняется с некоторой степенью точности. Имеются расхождения и в условиях испытаний. Поэтому всякое подобие сложного процесса является в какой-то степени приближенным.

Пусть в натуре зависимость какой-либо переменной величины  $y$  от другой переменной  $x$  изображается в виде

$$y^H = f^H(x^H).$$

В модели аналогичная зависимость выглядит следующим образом

$$y^M \pm \Delta y = f^M(x^M),$$

где  $\Delta y$  – погрешность моделирования.

Погрешности моделирования может определяться следующими основными факторами:

- 1) заданием (определением) параметров натуре, входящих в критерии подобия, и воспроизведением этих параметров на модели;
- 2) погрешностями измерений при проведении испытаний;
- 3) наличием факторов, иначе проявляющихся в опытах на модели, чем в опытах на натуре;
- 4) неполным учетом факторов, влияющих на результат моделирования.

Неточности первого вида можно свести к некоторым суммарным неточностям воспроизведения критериев подобия. Неточности измерения могут быть уменьшены многократным повторением измерений, использованием более точных приборов. Влияние факторов третьего и четвертого видов может привести к тому, что зависимости, полученные на модели, будут отличаться от аналогичных зависимостей, полученных в натуре.

Рассмотрим неточности в определении параметров, входящих в критерии подобия, и их влияние на критерии подобия. Обозначим через  $A$  и  $B$  некоторые физические параметры, входящие в критерий подобия. Идеальное значение этих величин в натуре  $A^H$  и  $B^H$ .

Соответствующие им величины в модели:

$$A^M = A^H / m_A; \quad B^M = B^H / m_B,$$

где  $m_A$  и  $m_B$  – масштабные коэффициенты.

Фактические значения этих параметров отличаются от идеальных значений. Поэтому запишем

$$A_\phi^H = A^H (1 \pm \delta_A^H); \quad B_\phi^H = B^H (1 \pm \delta_B^H);$$

$$A_\phi^M = A^M (1 \pm \delta_A^M); \quad B_\phi^M = B^M (1 \pm \delta_B^M),$$

где  $\delta_A^H, \delta_B^H, \delta_A^M, \delta_B^M$  – относительные погрешности.

Критерий подобия может быть представлен в виде /3/

$$\pi = [A]^\alpha \cdot [B]^\beta,$$

где  $\alpha$  и  $\beta$  – показатели степени со своими знаками.

Критерий подобия, составленный из идеальных величин, называется идеальным. Он одинаков для модели и натуре.

Фактический критерий подобия отличается от идеального. Это отличие представим так:

$$\pi_\phi^M = \xi_\pi \pi_\phi^H; \quad \pi_\phi^H = \xi^H \pi; \quad \pi_\phi^M = \xi^M \pi.$$

Здесь  $\xi_\pi$  характеризует погрешность в определении критерия подобия.

Для выяснения зависимости  $\xi_\pi$  от погрешности в определении параметров модели и натуре выразим критерий подобия один раз через фактические параметры модели, а другой раз – через фактические параметры натуре:

$$\begin{aligned} \pi_{\phi}^m &= [A^m (1 \pm \delta_A^m)]^\alpha \cdot [B^m (1 \pm \delta_B^m)]^\beta = \\ &= \pi (1 \pm \delta_A^m)^\alpha \cdot (1 \pm \delta_B^m)^\beta \\ \pi_{\phi}^n &= [A^n (1 \pm \delta_A^n)]^\alpha \cdot [B^n (1 \pm \delta_B^n)]^\beta = \\ &= \pi (1 \pm \delta_A^n)^\alpha \cdot (1 \pm \delta_B^n)^\beta \end{aligned}$$

Разделив  $\pi_{\phi}^m$  на  $\pi_{\phi}^n$ , после преобразований, включающих возведение в степень по формуле Ньютона, отбрасывание слагаемых второго и выше порядка малости, а также замену полученного сложного выражения приближенной формулой, приходим к соотношению

$$\xi_{\pi} = 1 \pm \alpha(\delta_A^m \pm \delta_A^n) \pm \beta(\delta_B^m \pm \delta_B^n). \quad (4)$$

Из этого соотношения следует, что для уменьшения погрешности в определении критерия подобия нужно как можно больше уменьшить погрешность у тех величин, которые входят в критерий подобия с наивысшим показателем степени.

Пусть, например, при изучении естественной сушки увлажненной ограждающей конструкции относительная погрешность в определении характерного размера  $l$  в критерии (2) на модели и натуре составила лишь 0,2 (на практике эта погрешность может быть значительно больше). Учитывая, что характерный размер  $l$  входит в критерий подобия (2) с показателем степени равным двум, по формуле (4) получаем оценку погрешности в определении критерия подобия  $\xi_{\pi} = 1 + 2(0,2 + 0,2) = 1,8$ . Это означает, что перенос результатов моделирования с модели на натуру на основе идеального критерия подобия приведет к результатам, отличающимся от фактических почти в два раза.

Можно сослаться на другой пример [4], когда погрешность в определении довольно простого критерия геометрического подобия составила  $\xi_{\pi} = 2,2$ .

Таким образом, из-за невозможности в эксперименте достаточно точно воспроизводить параметры, входящие в критерий подобия, прогнозные оценки долговечности строительных материалов будут весьма приблизительными. Если полученная степень приближения не удовлетворяет, то можно попытаться решить задачу другим путем.

### 3. ОЦЕНКА ДОЛГОВЕЧНОСТИ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ПОДОБИИ ПРОЦЕССОВ ИЗНАШИВАНИЯ

Следуя рекомендациям работы [2], главным процессом, подобие которого необходимо обеспечить при исследовании долговечности строительных материалов методом физического моделирования, является процесс возникновения отказа. Для увлажненных материалов наружных слоев ограждающих конструкций таким процессом является процесс их изнашивания, который выражается в постепенном шелушении (отслаивании) материала. В качестве физических моделей при проведении испытаний можно использовать небольшие однотипные образцы материалов, взятых непосредственно из конструкции или изготовленные специально.

Для множества однотипных образцов процесс изнашивания будет случайным, представленным совокупностью реализаций. Время до пересечения изучаемым случайным процессом изнашивания предельно допустимого уровня изнашивания материала (границы рабочей области) является случайной величиной, распределение которой характеризует долговечность рассматриваемой модели.

Если реализации случайного процесса изнашивания - линейные функции времени, то моделью процесса изнашивания является полуслучайный линейный процесс, описываемый уравнением:

$$Y(t) = Y_0 + Bt, \quad (5)$$

где  $Y_0$  - начальное значение параметра изнашивания, характеризующего работоспособность материала;

$B$  - случайная скорость изнашивания.

Для такого процесса детерминированной является функциональная (линейная) зависимость параметра изнашивания от времени, а как случайные рассматриваются величины  $Y_0$  и  $B$ .

Условия, обеспечивающие подобие линейного случайного процесса изнашивания модели и оригинала, формулируются следующим образом. Каждой реализации процесса изнашивания в модели соответствует реализация рассматриваемого процесса в оригинале, описываемая уравнением:

$$y(t) = y_0 + bt. \quad (6)$$

Согласно третьей теореме подобия необходимыми и достаточными условиями подобия являются равенство критериев подобия и пропорциональность сходственных параметров, входящих в условие однозначности. Из уравнения (6) получается один независимый критерий подобия:

$$\pi_l = \frac{y_0}{bt} = idem. \quad (7)$$

Условия однозначности:

начальное  $y(t) = y_0$  при  $t = 0$ ;

граничное  $y(t) = y_{zp}$  при  $t = t_{zp}$ ,

где  $y_{zp}$  - граница рабочей области,

$t_{zp}$  - время безотказной работы, которое в рассматриваемом случае совпадает с долговечностью, так как отказ и переход материала в предельное состояние происходят одновременно.

При граничных (предельных) условиях критерий подобия имеет вид

$$\pi_l = \frac{y_0}{bt_{zp}}. \quad (8)$$

Испытав  $n$  образцов в заданном режиме, получают  $n$  реализаций процесса изнашивания и соответственно  $n$  реализаций величины  $t_{zp}$  для модели.

С помощью критерия подобия (8) от оценки долговечности, полученной на модели, можно перейти к оценке долговечности оригинала. Как уже отмечалось, точность получаемых оценок существенно зависит от точности воспроизведения параметров, входящих в критерий подобия. Для повышения степени точности физического моделирования требуется, чтобы образцы испытываемых материалов были однотипными. Это значит, что они должны характеризоваться одинаковой достаточно полной совокупностью начальных внутренних параметров и быть геометрически подобными.

Однородности внутренних свойств испытываемого материала следует добиваться при изготовлении образцов. Геометрическое подобие образцов будет обеспечено тогда, когда они имеют одинаковую форму и размеры. Для образцов, изготавливаемых из новых материалов, это условие выполнить проще, чем для образцов, выпиливаемых из конструкции. Поэтому может возникнуть задача приведения образцов с различной формой и размерами к единому образцу, выбранному в качестве базового. При решении этой задачи можно воспользоваться теорией подобия.

При изучении процесса изнашивания каменных материалов защитно-отделочных слоев ограждений зданий наиболее

информативным количественным показателем поверхностной эрозии материалов является значение массы материала, теряемой единицей поверхности ограждения (оригинала) или образца (модели). В этом случае приведение результатов испытаний, полученных на образцах различной формы и размеров, следует выполнять, опираясь на критерий подобия в виде отношения поверхности образца  $S$  к его объему  $V$ , характеризующего удельную поверхность образцов. Если образцы выполнены из одного и того же материала с одинаковыми свойствами, то значения плотности  $\rho$  у них одинаковы. Тогда объем образца  $V$  можно заменить его массой  $m$  и записать критерий подобия как отношение  $S/m$ .

#### 4. ОБЕСПЕЧЕНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКОГО ПОДОБИЯ ОБРАЗЦОВ В ОПЫТАХ НА ИЗНАШИВАНИЕ

Для проверки работоспособности критерия подобия  $S/m$  был выполнен эксперимент, в котором варьировалась масса и форма гипсовых образцов. Образцы имели форму куба (двух типоразмеров) и прямой треугольной призмы. Они изготавливались путем заливки раствора в металлические формы. Было изготовлено шесть призматических образцов-близнецов и по три для каждого типоразмера куба. Средние значения начальной массы  $m_0$  кубических образцов составляли 14,28 г и 7,4 г. Призматические образцы имели среднюю массу  $m_0=6,9$  г. Переход от большего куба к меньшему увеличивал значение критерия  $S/m$ . Такой же эффект дает переход от куба к одинаковой по массе призме. Все образцы испытывались на влагостойкость при попеременном увлажнении и высушивании. Один цикл этих испытаний включал 16 часов увлажнения образцов в воде при температуре  $20^{\circ}C$  и 8 часов пребывания в сушильном шкафу при температуре, равной  $55-60^{\circ}C$ . После  $i$ -го цикла ( $i=1, 8, 13, 18, 21, 26, 31$ ) для всех образцов производилось высушивание до постоянной массы и определялась относительная потеря массы

$$\Delta m_i = \frac{m_0 - m_i}{m_0} \cdot 100\%, \quad (9)$$

где  $m_0$  и  $m_i$  - среднее значение массы сухих образцов до испытаний и после  $i$ -го цикла испытаний.

Наблюдения за износом образцов в процессе испытаний позволили установить ожидаемый эффект наиболее интенсивного шелушения (вымывания) материала в районе ребер и вершин образцов, приводящего к их скруглению.

Результаты выполненного эксперимента показаны на рис. 1, из которого следует, что построенные по опытным данным кривые, отражающие три реализации кинетики поверхностной эрозии гипсовых образцов с различными значениями критерия  $S/m$ , являются подобными. Эти кривые могут быть описаны нелинейной функцией времени детерминированного процесса изнашивания в период приработки [2]

$$y(t) = y_0 + bt^n, \quad (10)$$

где показатель степени  $n < 1$ .

Применительно к нашему случаю вместо (10) получим

$$\Delta m(N) = bN^n, \quad (11)$$

где  $N$  - число циклов попеременного увлажнения и высушивания.

Следует отметить, что от числа циклов  $N$  путем различных преобразований можно перейти к значениям натурально

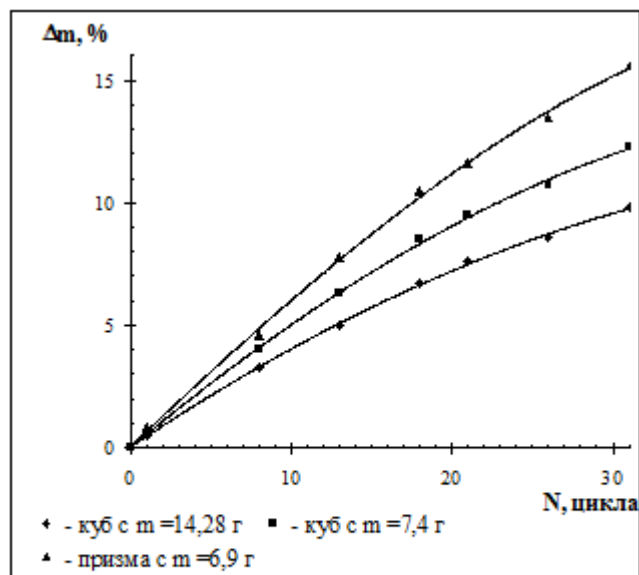


Рисунок 1. Зависимость относительной потери массы гипсовых образцов  $\Delta m$  от числа циклов

го времени  $t$ . Один из подходов к решению этой задачи рассмотрен в работе [5], а другой - в [6].

После перехода от различных исходных образцов к единому кубическому образцу с начальной массой  $m_0=10$  г, выполненного с использованием критерия  $S/m$  и формул работы [6], оказалось, что приведенные к единому образцу опытные данные трех реализаций практически слились (рис. 2) и достаточно точно аппроксимируются уравнением

$$\Delta m(N) = 0,7N^{0,8}. \quad (12)$$

Таким образом, при изучении процессов изнашивания поверхности защитно-отделочных слоев ограждений зданий можно использовать образцы материала с различной геометрией. При этом необходимо стремиться к тому, чтобы образцы имели максимально возможную массу (объем) и минимальную относительную длину ребер  $l/m$ . Именно последний фактор является причиной того, что после 13 циклов испытаний потеря массы для призматических образцов незначительно, но устойчиво превышала таковую для кубических образцов (рис. 2).

#### 5. УСКОРЕННЫЕ ИСПЫТАНИЯ ПРИ ОЦЕНКЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ

Аппарат теории подобия можно использовать для определения коэффициента пересчета показателя долговечности, полученного при испытаниях в форсированном режиме  $\varepsilon^*$ , на нормальный режим  $\varepsilon_0$ . При этом необходимо обеспечить подобие возникновения отказа в нормальном и форсированном режимах. Оно будет справедливо только в том случае, когда жесткость форсированного режима не выше максимально допустимой жесткости, превышение которой приводит к нарушению закономерностей процессов изнашивания в нормальном режиме.

Если процесс изнашивания описывается линейной функцией (5), то при граничных условиях уравнения реализаций этого процесса в нормальном и форсированном режимах для одного и того же образца имеют вид:

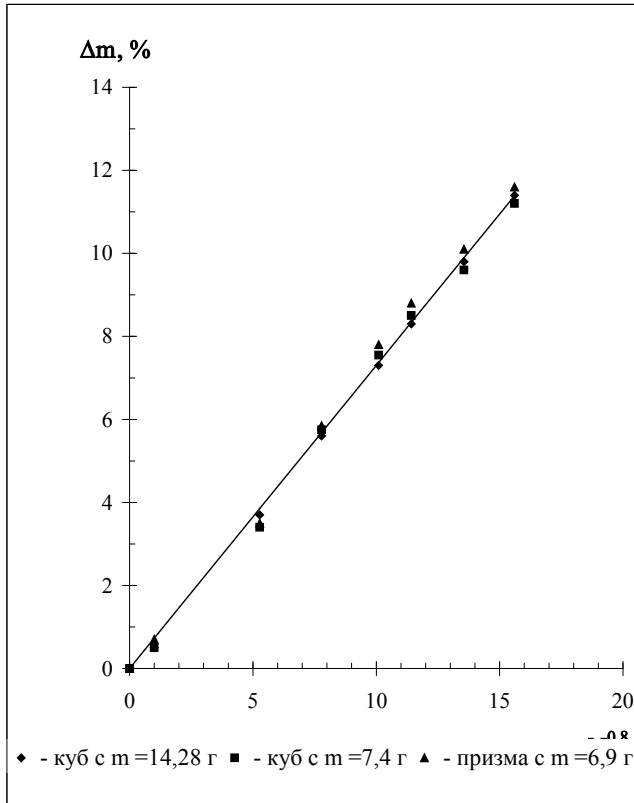


Рисунок 2. Зависимость относительной потери массы гипсовых образцов  $\Delta m$ , приведенных к базовому кубическому образцу с  $m_0=10$  г от числа циклов попеременного увлажнения - высушивания  $N$  в степени 0,8

$$\left. \begin{aligned} y_{zp} &= y_0 + bt_{zp} \\ y_{zp} &= y_0 + b^*t_{zp}^* \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

где  $y_{zp}$  – граница рабочей области,

$t_{zp}$  и  $t_{zp}^*$  – время безотказной работы (долговечности) образца в нормальном и форсированном режимах,

$b$  и  $b^*$  – скорость изнашивания в нормальном и форсированном режимах.

Если процессы (13) подобны, то должно соблюдаться равенство

$$bt_{zp} = b^*t_{zp}^* \quad (14)$$

Тогда время работы каждого образца может быть пересчитано с форсированного режима на нормальный

$$t_{zp} = t_{zp}^* \frac{b^*}{b} \quad (15)$$

Если реализации полуслучайного процесса изнашивания являются нелинейными функциями времени, то можно аппроксимировать этот процесс кусочно-линейной функцией времени

$$Y(t) = Y_0 + \sum_i B_i \Delta t_i \quad (16)$$

Для перехода от исходной нелинейной функции к функции (16) каждая реализация исходной функции заменяется на  $i$ -м участке линеаризации секущей прямой, в результате чего реализация заменяется функцией

$$y(t) = y_0 + \sum_{i \leq k} b_i \Delta t_i \quad (17)$$

где  $b_i$  – угловой коэффициент секущей прямой, соответствующей  $i$ -му участку линеаризации;

$\Delta t_i = t_i - t_{i-1}$  – время от начала  $i$ -го участка линеаризации;

$k$  – число участков линеаризации.

При граничных условиях (17) имеет вид:

$$y_{zp} = y_0 + \sum_{i=1}^k b_i \Delta t_i \quad (18)$$

Разделив почленно (18) на  $y_{zp}$ , получим  $k$  определяющих критериев подобия функции (18):

$$\pi_1 = \frac{b_1 \Delta t_1}{y_{zp}}, \pi_2 = \frac{b_2 \Delta t_2}{y_{zp}}, \dots, \pi_k = \frac{b_k \Delta t_k}{y_{zp}} \quad (19)$$

Из (15), (16) и (19) следует, что при нелинейном процессе возникновения отказа время безотказной работы каждого образца определяется путем пересчета с форсированного режима на нормальный с помощью соотношения

$$t_{zp} = \sum_{i=1}^k \Delta t_i^* \frac{b_i^*}{b},$$

где  $\Delta t_i^* = t_i^* - t_{i-1}^*$  – длина  $i$ -го участка линеаризации процесса изнашивания при испытаниях в форсированном режиме;

$b_i$  и  $b_i^*$  – угловые коэффициенты секущих прямых, определяющих скорость изнашивания на  $i$ -м участке линеаризации в нормальном и форсированном режимах.

Таким образом, использование аппарата теории подобия позволяет установить аналитическую зависимость между долговечностью, получаемой при испытании образцов в нормальном и форсированном режимах. Пример использования форсированных испытаний для прогнозирования остаточного ресурса долговечности материалов рассмотрен нами в работе /6/.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ путей решения задачи прогнозирования долговечности материалов ограждающих конструкций показал, что эта задача может быть успешно решена с помощью физического моделирования при обязательном использовании аппарата теории подобия. При построении критериев подобия, обеспечивающих корректный перенос результатов ускоренных лабораторных испытаний, необходимо как можно глубже проникать в физику и особенности процесса деградации материалов при воздействии окружающей среды. Без этого трудно добиться необходимой точности прогноза.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Ильинский В.М. Строительная теплофизика. – М.: Высшая школа, 1974. – 320с.
2. Надежность и эффективность в технике: Справочник: В 10 т/ Ред. совет: В.С. Авдеевский (пред.) и др. – М.: Машиностроение, 1986. Т.4: Методы подобия в надежности// Под ред. В.А. Мельникова, Н.А. Северцева. – 280 с.
3. Седов Л.И. Методы подобия и размерности в механике. – М.: Наука ФМ, 1987. – 432с.
4. Nikitin W., Szlendak I. O sposobie modelowania stalowego szkieletu przestrzennego/ Referaty Konferencji Nauk. Techn. «Połączenia podatne w konstrukcjach stalowych» – Białystok, 1997.

5. Aksenowa I.W., Objedkow W.A. Cykliczność oddziaływania środowiska na wykończenie wnętrz w nicogrzewanych budynkach Zabytkowych/ Materiały Seminarium Polsko-Rosyjskiego. – Irkuck, 1997.
6. Nikitin W., Lapko A. Metody oceny przydatności użytkowej elementów i wykończenia wnętrz w budynkach zabytkowych /Referaty II Konferencji Nauk. Techn. "Budownictwo Sakralne", 98. –Białystok, 1998.

УДК 624.075.012.41

Казачек В.Г.

## УТОЧНЕНИЕ МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАСЧЕТНЫХ ДЛИН СТУПЕНЧАТЫХ КОЛОНН ОДНОЭТАЖНЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ЗДАНИЙ

Предложено несколько уточненных методов определения расчетных длин ступенчатых и двухветвевых колонн и учета характера проявления продольного изгиба по длине элементов, которые могут служить основой для разработки программ для ЭВМ. По расчету каркасов одноэтажных промзданий как плоской, так и пространственной системы в целом сразу на всю комбинацию нагрузок. Однако решение задач в пространственной постановке весьма сложно и ряд вопросов еще окончательно не решен. Например, в структуре расчета на устойчивость первого рода стандартная программа "ПУСК" малоприспособна для использования в практическом проектировании в условиях многовариантного нагружения. В таких условиях наиболее реальным и приемлемым, с практической точки зрения, кажется расчет каркаса как плоской рамы.

Одной из задач настоящей работы является разработка более точного, чем это предусмотрено нормами, метода определения расчетных длин сжатых элементов крановых колонн, а также рекомендаций по учету перераспределения усилий по длине колонн в условиях продольно-поперечного изгиба. Первым этапом теоретических исследований в этой области явилась разработка и совершенствование на основании расчета на устойчивость первого рода в упругой постановке общего метода определения расчетных длин колонн, являющихся элементами системы каркаса одноэтажного производственного здания, оборудованного мостовыми кранами. При этом рассматривается поперечная рама, деформируемая в своей плоскости.

Для железобетонных каркасов наиболее правомерен подход, когда считается, что несущую способность теряет только рассматриваемая стойка (предполагается, что в ней возникло критическое состояние из-за пониженных характеристик материалов и т.д.), а остальная часть каркаса в определенной мере оказывает поддерживающее влияние. При этом нагрузка, воспринимаемая всеми колоннами, кроме рассматриваемой, в данный момент времени остается неизменной. В такой постановке задача сводится к расчету на устойчивость отдельной стойки с пружиной. В качестве пружины приняты аналогичные стойки (постоянного сечения, одноступенчатые, двухветвевые), нагруженные постоянными силами (рис. 1).

При определении жесткости пружины в общем случае следует учитывать поворот диска покрытия при действии несимметричных нагрузок (например, крановых). Однако, учитывая, что эксперименты и данные расчетов [1, 2] показали незначительное влияние (до 10 %) этого фактора на окончательные результаты, последующий анализ был выполнен без учета поворота диска покрытия.

Величина жесткости пружины  $C^0$  зависит от количества и типа поддерживающих стоек. Был проведен анализ влияния количества поддерживающих стоек на величину коэффициен-

тов расчетной длины  $\mu_B$  и  $\mu_H$ .

Для получения качественной и количественной оценки этой зависимости было выполнено более 800 вариантов расчетов. В выполнении расчетов принимал участие аспирант

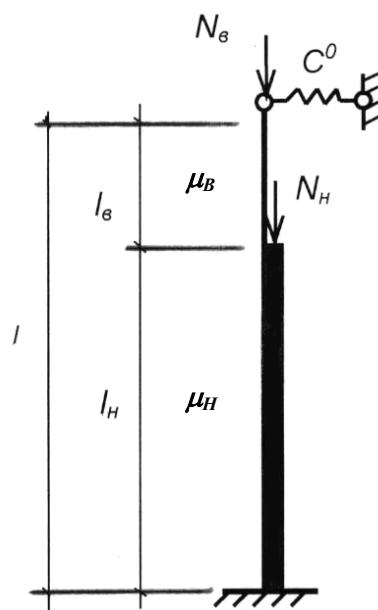


Рисунок 1. Расчетная схема главной стойки

Фархад Махмуд Хасан.

Параметры расчетных величин принимались для реальных пространственных блоков. Переменными параметрами являлись:

- высота стойки;  $H = 9,0 \div 14,4$  м (через 0,6 м);
- грузоподъемность крана  $Q = 10$  т;  $Q = 30$  т;
- соотношение длин верхней и нижней частей колонны в зависимости от грузоподъемности крана;
- значение верхней продольной силы  $N_B^{max}$ ,  $N_B^{min}$ ;
- наличие или отсутствие продольной силы на подкрановую часть колонны  $N_H = D_{max}$ ,  $N_H = 0$ ;
- соотношение жесткостей верхней и нижней частей колонны  $I_B/I_H < 1$ ;  $I_B/I_H = 1$ .

Количество поддерживающих стоек принималось таким, которое возможно в реальных зданиях и изменялось от  $n = 1$  (однопролетная рама при расчете на ветер) до  $n = 16$  (пространственная трехпролетная рама). Для сравнения рассмат-

Казачек В.Г. К.т.н Белорусской государственной политехнической академии.  
Беларусь, БГПА, г. Минск, пр.Ф. Скорины 65.