

МЕТОДИКА МОДЕЛИРОВАНИЯ ЯВЛЕНИЙ АЭРОУПРУГОСТИ

Чемодуров¹ В.Т., Кузьменко² О.А., Хитрук³ С.А.

Академии строительства и архитектуры (структурное подразделение) ФГАОУ ВО КФУ им. В.И. Вернадского, г. Симферополь, ул. Киевская, 181, Россия
e-mail: e-mail: ¹chens_mu1@mail.ru, ²olya.kuzy@mail.ru, ³sergej.xitruk97@mail.ru

Аннотация. Материал, включенный в статью, является обобщением опыта работы авторов в области постановки и проведению модельных испытаний строительных конструкций. Составной частью эксперимента являются теории физического моделирования, которая дает правильный подход к постановке и проведению опытов.

Создание строительных сооружений различного класса и назначения основано на обширных предварительных исследованиях, среди которых, наряду с вычислительной работой, важную роль играет испытания моделей отдельных элементов конструкции. В статье, опираясь на теорию физического моделирования, дается ответ на два вопроса:

- как создать модель, подобрать реальному объекту (висячего моста);
- как пересчитать результаты эксперимента на изучаемый объект.

Предмет исследования: Исследование проведено в области аэроупругости сооружений. Рассматривается проблема учета изгибно-крутильных колебаний моделей пролетов висячих мостов при определении возникновения в них внутренних усилий, которые влияют на прочность и устойчивость конструкции.

Материалы и методы: в работе используются теоремы и методы физического моделирования механических явлений.

Результаты: Результатом исследования является разработанная методика постановки и проведения испытаний физической модели пролета висячего моста

Выводы: Представленная методика разработана впервые и может служить инструментом для проведения проектных расчетов сооружений данного класса.

Ключевые слова: физическая (механическая) модель, критерий подобия, теория размерностей, механическое подобие, масштабный эффект, безразмерные комплексы физических величин.

ВВЕДЕНИЕ

При чисто теоретических исследованиях механических явлений обычно исследуются различного вида функциональные уравнения – обычно дифференциальные. Эти уравнения служат для установления общих качественных свойств движения и для фактического вычисления искомых функциональных связей с помощью различных математических операций. Однако механическое исследование не всегда возможно осуществить путем математических рассуждений и обсуждений. Очень часто мы не имеем вообще математической постановки задачи, так как исследуемое механическое явление настолько сложно, что для него пока еще нет удовлетворительной схемы и нет еще уравнений движения. С таким положением часто встречаются при решении многих важных задач в области аэромеханики, при изучении прочности и деформации различных конструкций и тому подобное. В этих случаях главную роль играют экспериментальные методы исследования, которые дают возможность установить простейшие опытные факты, на основе которых можно формировать законы, управляющие исследуемым явлением и записать их в виде некоторых математических соотношений.

АНАЛИЗ ПУБЛИКАЦИЙ

Со времен Галилея (то есть с 17-го века) необходимым базисом научной теории и применения ее на практике становится эксперимент. Он стал существенным фактором науки в ее современном виде и занимает центральное место. Важность данного метода исследования заключена в его преимуществах:

– при эксперименте мы намерено заставляем происходить то или другое, и заставляем происходить так, чтобы наблюдение делалось удобным; мы устраняем то или другое из окружающих обстоятельств, наблюдаем изменения, которые являются при этом устранении, и делаем свои заключения (словом, активно воздействуем на предмет);

– эксперимент позволяет исследовать свойства объектов, функционирующих в экстремальных условиях, что может привести к обнаружению самых неожиданных и удивительных свойств у обыкновенных вещей и тем самым позволяет глубоко проникнуть в их сущность;

– эксперимент может быть проведен, как правило, столько раз, сколько нужно для получения достоверных данных.

Таким образом, под экспериментом можно понимать совокупность действий, к которым приходится обращаться, чтобы задавать природе интересующие нас вопросы. Не каждый эксперимент, и в особенности в области военно–

научного исследования, можно поставить на натурном объекте. Но любой эксперимент — исследовательский, проверочный или иллюстративный — может быть осуществлен на «заменителе» данной природы — модели. Важнейшим достоинством экспериментирования с моделью является возможность изучения ее в более широком диапазоне условий, чем это допускает непосредственное оперирование с оригиналом.

Модели бывают разные. Моделей бывает много. Чтобы выбрать одну из них, надо понять, что мы хотим от модели, какие требования мы к ней предъявляем. Согласно определению В. А. Штоффа «под моделью понимается такая мысленно представляемая или материально реализованная система, которая, отображая или воспроизводя объект исследования, способна заменить его так, что ее изучение дает нам новую информацию об этом объекте». Таким образом, если модель достаточно точно описывает объект, то ее эксперимент на объекте может быть заменен экспериментом на модели. Из всего существующего многообразия моделей в дальнейшем остановимся на:

- физических моделях, которые сходны с оригиналом по физической природе и геометрической форме;

- математических моделях, которые конструируются из элементов иной физической природы, по сравнению с оригиналом, но описываются той же системой математических зависимостей, что и оригинал.

Физическое и математическое моделирование широко применяется в научных исследованиях. Это объясняется тем, что натурные эксперименты на реальных строительных объектах зачастую невозможно организовать по различным соображениям (экономическим, временным, безопасности и так далее).

При разработке модели исследуемого явления, несомненным является вопрос о достоверности (истинности) построенной модели и полученных результатов эксперимента.

Истинной называется знание, соответствующее объективной действительности. Видимо определение истинности модели не должно отличаться от общего и традиционного определения истинности в материалистической гносеологии. То есть истинность модели означает соответствие модели объекту, а ложность модели состоит не просто в соответствии с оригиналом, а в наличии конкретной формы этого соответствия, которая предусматривается природой, типом моделей и целям применения модели в каждом отдельном случае.

Для моделей, обладающих с натурой одной и той же физической природой, условия их соответствия с оригиналом разработаны в теории подобия. К числу таких условий относится необходимость сохранения геометрического, кинематического, динамического теплового и других элементов

подобия, учитываемых в каждом конкретном случае.

Условия сходства модели и объекта в математическом моделировании, основанном на физических аналогиях, предполагающих при различии физической природы процессов в модели и объекте тождество математической формы, в которой выражаются их общие закономерности, являются более общими.

Необходимо при этом иметь в виду, что при построении тех или иных моделей всегда сознательно отвлекаются от некоторых сторон, свойств и даже отношений, в силу чего заведомо допускается не сохранение сходства между моделью и оригиналом по ряду параметров, которые вообще не входят в формулирование условий сходства. Исходя из этого, можно сказать, что истинная модель — это такая модель, структура которой в рамках выбранных нами условий соответствия тождественна, совпадает со структурой оригинала, взятой в отвлечении от других свойств отношений и элементов. Следовательно, модель, в которой отсутствует тождество, совпадение ее структуры со структурой оригинала, будет ложной моделью.

Приведем пример. В задачах исследования несущей способности мостовых конструкций сходство между моделью и оригиналом должно заключаться в тождестве нагрузок, полей внутренних усилий и деформаций в сходственные моменты времени. Для данных условий соответствия достаточно модель мостовой конструкции в виде ее кинематической схемы, сохраняя при этом пропорциональность внешних сил, действующих на оригинал и модель. В такой постановке наша модель отражает истину. Если мы хотим рассмотреть вопросы крепления элементов моста, то выше приведенная модель окажется ложью, так как сама кинематическая схема является лишь условным представлением элементов крепления. Таким образом, любая модель является истиной лишь в рамках выбираемых условий соответствия, то есть истиной относительной. Создание абсолютно истинной модели означало бы осуществление в модели полного соответствия с оригиналом, то есть построение второго экземпляра этого объекта.

Модель является выражением относительной истины потому, что:

- каждая модель является временной, преходящей, отражающей лишь исторически определенной ступени проникновения познания в объективную структуру и закономерности функционирования объекта;

- каждая модель неизбежно является односторонней, частичной в силу тех отвлечений и упрощений, которые при ее помощи реализуются;

- многие модели относятся к объекту на основе аналогии, предполагающей различие в «физической» природе элементов модели и объекта;

- в некоторых моделях допускается элемент отхода от действительности, элементы научной

фантазии, а, следовательно, некоторые элементы фиктивности.

Невозможность построения абсолютно истинной модели и необходимость ограничиваться всегда лишь относительно истинными моделями не означает, что в моделях не могут содержаться зерна абсолютной истины. Динамическое единство абсолютного и относительного в модели обнаруживается достаточно ясно, если взглянуть на процесс развития моделей, их выдвижения, изучения, экспериментальной проверки, последующего уточнения или изменения и, наконец, смены одной модели другой.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Рассмотрим колебание плоской пластины в потоке воздуха. В данном случае имеем взаимодействие следующих сил: аэродинамических, упругих и инерционных. Изучение колебательного движения пластины сводится к исследованию задачи о динамической устойчивости конструкции. Потеря динамической устойчивости конструкции происходит по схеме: при некотором случайном отклонении пластины от состояния равновесия появляются колебания, которые поддерживаются энергией потока воздуха, и могут возрастать вплоть до разрушения конструкции.

Составной частью эксперимента является теория физического моделирования, которая дает правильный подход:

- к постановке опыта;
- к обработке опытных данных;
- к распространению полученных результатов на другие объекты, недоступные эксперименту.

Создание строительных сооружений различного класса и назначения основано на обширных предварительных исследованиях, среди которых, наряду с вычислительной работой, важную роль играют испытания моделей отдельных элементов конструкции или даже системы в целом.

При этом возникают два вопроса:

- как создать модель, подобную изучаемому объекту;
- как пересчитать результаты эксперимента на изучаемый объект?

Ответ на эти вопросы дает теория подобия и размерностей. Она необходима для грамотной постановки опыта и анализа полученных данных.

Подобие физических явлений можно представить как обобщение геометрического подобия. Два явления, подчиненных одним и тем же физическим законам, называются физически подобными, если характеризующие их однородные физические величины находятся в одинаковом отношении в любых сходственных точках пространства и в любые сходственные моменты времени. Эти отношения называются переходными масштабами. Однородными называются величины, имеющие одинаковый физический смысл,

одинаковую размерность. (Например, координаты и линейные размеры или все скорости). Таким образом, при физическом подобии все величины, характеризующие один процесс $(\alpha_1, \beta_1, \dots, \omega_1)$, могут быть получены путем умножения величин, характеризующих другой процесс $(\alpha_2, \beta_2, \dots, \omega_2)$, на постоянные числа (переходные масштабы m), которые для всех однородных величины одинаковы:

$$\alpha_2 = m_\alpha \alpha_1, \beta_2 = m_\beta \beta_1, \dots, \omega_2 = m_\omega \omega_1. \quad (1)$$

Здесь индекс при m указывает, к какой величине масштаб относится.

Однородные физические величины, связанные с исследуемым процессом, делятся на две группы:

- определяющие (процесс) физические величины;
- определяемые (в результате эксперимента) физические величины.

Первые состоят из величин, входящих в условия однозначности, и независимых переменных (координат, времени), все остальные являются определяемыми величинами.

Условия однозначности – наперед заданные условия, которые однозначно определяют протекание изучаемого процесса. Условия однозначности задают:

- геометрическую форму и размеры пространства, где протекает процесс;
- физические свойства сред, участвующих в процессе, то есть численные значения физических параметров, существенных для изучаемого явления;
- полную характеристику процесса в начальный момент времени;
- условия протекания процесса на его границах (граничные условия).

Физическое подобие может иметь различные виды в зависимости от того, между какими явлениями оно устанавливается.

Кинематическое подобие – подобие в полях скоростей и ускорений твердых тел.

Инерциальное (массовое) подобие – подобие в распределении масс.

Динамическое подобие – подобие сил, вызывающих подобные движения.

Тепловое подобие – подобие температур и тепловых потоков.

Системы, которые одновременно имеют кинематическое, массовое и динамическое подобие, являются механически подобными.

Пусть пластина длиной L_x и поперечным размером L_z имеет жесткое крепление на ее концах. Исследуем ее изгибно-крутильные колебания. При симметрии поперечного размера пластины ось центров масс совпадает с ее осью жесткости, а центр давления потока воздуха располагается примерно на одной четвертой поперечного размера (рисунок 1) Введем следующие обозначения физических величин, характеризующих колебательный процесс

пластины в потоке воздуха: l – характерный размер; ρ – плотность материала пластины; v – скорость набегающего потока воздуха; m_0 – погонная масса пластины; EJ, GJ_p – изгибная жесткость и жесткость пластины на кручение; y, θ – прогиб и угол поворота сечения пластины.

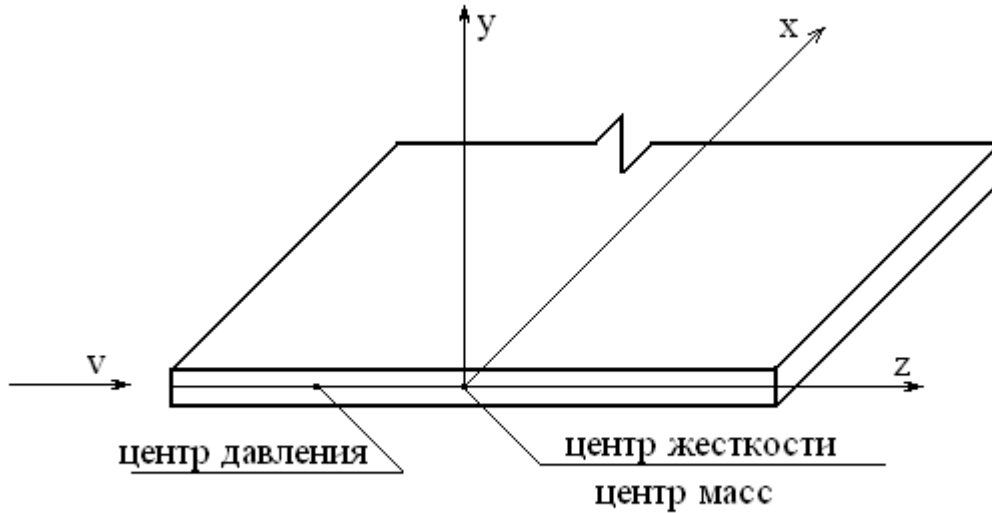


Рис. 1. Схема обтекания пластины потоком воздуха
Fig. 1. Scheme of air flow around the plate

Внешняя нагрузка включает в себя:

–подъемная сила на единицу длины пластины

$$Y = C_y \frac{\rho_0 v^2}{2} L_z; \quad (2)$$

–аэродинамический момент на единицу длины пластины

$$M = C_m \frac{\rho_0 v^2}{2} L_z^2. \quad (3)$$

Здесь: ρ_0 – плотность воздуха; C_y, C_m – аэродинамические коэффициенты, которые для плоской пластины имеют теоретические зависимости.

Задача о движении однородной упругой пластины в потоке воздуха сводится к решению уравнений:

$$\left. \begin{aligned} EJ \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} + m_0 \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} + Y &= 0, \\ GJ_p \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} - J_{m0} \frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} + M &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Граничные условия следующие:

$$\left. \begin{aligned} y = 0, \quad \theta = 0, \\ \text{при } x = 0 \text{ и } x = L: \quad \frac{\partial y}{\partial x} = 0. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Так как скорость потока воздуха в данном исследовании значительно меньше скорости звука, то его взаимодействие с пластиной ограничим коэффициентом кинематической вязкости ν , турбулентной составляющей пренебрегаем. Определяемыми физическими величинами являются: y – вертикальное перемещение пластины; σ – напряжение в сечении пластины. Таким образом, можно записать следующие соотношения.

$$\left. \begin{aligned} y &= f_1(l, v, \rho, \nu, EJ, GJ_p, m_0, J_m, \lambda, t, k), \\ \sigma &= f_2(l, v, \rho, \nu, EJ, GJ_p, m_0, J_m, \lambda, t, k). \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

В круглых скобках дается список определяющих физических величин. (Здесь λ – частота изгибных колебаний пластины, J_m – массовый момент инерции, k – показатель адиабаты расширения воздуха).

Установление законов подобия тесно связано с анализом размерностей физических величин, характеризующих данное явление.

Величины, численное значение которых зависит от принятой системы единиц измерения, называются размерными величинами. Величины, численное значение которых не зависит от принятой системы единиц измерения, называются безразмерными величинами. Длина, время, сила, энергия, момент силы и так далее могут служить примерами размерных величин. Углы, отношение двух длин, отношение квадрата длины к площади, отношение энергии к моменту силы и тому подобное — примеры безразмерных величин.

Различные физические величины связаны между собой определенными соотношениями. Поэтому, если некоторые из этих величин принять за основные и установить для них какие-то единицы измерения, то единицы измерения всех остальных величин будут определенным образом выражаться через единицы измерения основных величин. Принятые для основных величин единицы измерения будем называть основными, а все остальные — производными.

На практике, при изучении механических явлений достаточно установить единицы измерения для трех величин. Так в физических исследованиях и в технике удобно за основные единицы взять единицы длины l , времени t и массы m . Для исследуемой конструкции удобно взять за основные единицы измерения следующие: l – характерный линейный размер, v – скорость набегающего потока воздуха, ρ – плотность материала пластины.

Как только установлены основные единицы измерения, единицы измерения для других механических величин, например, для силы, жесткости, массы, моментов инерции, частоты собственных колебаний, времени и тому подобное, получаются автоматически из их определения.

Перевод зависимостей (6) к безразмерным комплексам осуществляется на основании применения первой теоремы теории подобия, которая выражается следующим образом: у **подобных явлений критерии подобия численно одинаковы**. При этом: критерии подобия – это безразмерные степенные комплексы, составленные из величин, характеризующих процесс.

Вторая теорема теории подобия устанавливает правила перехода от физических величин к безразмерным комплексам: **во всяком физическом явлении можно найти связи не только между именованными величинами, характеризующими данное явление, но и между некоторыми комбинациями, то есть между критериями подобия**.

Не останавливаясь на подробной технологии вывода правил перехода от физических величин к безразмерным комплексам, приведем пример для любой физической величины, взятой из рассматриваемой задачи, например погонной массы m_0 .

$$P_{m_0} = \frac{m_0}{l^a v^b \rho^c} \quad (7)$$

Приравнявая размерности числителя и знаменателя, определяют неизвестные коэффициенты (показатели степеней физических величин знаменателя). Таким образом, получим

$$P_{m_0} = \frac{m_0}{l^2 \rho}$$

По аналогии с помощью π -теоремы можно составить восемь безразмерных комбинаций (критериев подобия), приняв l, v, ρ за физические величины с независимой размерностью. Будем иметь:

$$\left. \begin{aligned} \frac{y}{l} &= \varphi_1 \left(Re, Ca, \frac{GJ_p}{Ej}, \frac{m_0}{l^2 \rho}, \frac{J_{m0}}{j^4 \rho}, \frac{\lambda l}{v}, St, k \right), \\ \frac{\sigma}{v^2 \rho} &= \varphi_2 \left(Re, Ca, \frac{GJ_p}{Ej}, \frac{m_0}{l^2 \rho}, \frac{J_{m0}}{j^4 \rho}, \frac{\lambda l}{v}, St, k \right) \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Уравнение (8) называется **критериальным**, так как устанавливает связь между критериями подобия находим безразмерные комплексы всех физических величин.

В формулы (8) входят следующие критерии: $Re = vl/\nu$ – число Рейнольдса; $Ca = EL/l^4 v^2 \rho$ – число Коши; $St = vt/l$ – число Струхала.

Все безразмерные комплексы составлены из нескольких основных зафиксированных величин, имеющих в обычной системе независимую размерность. Так как, согласно первой теореме критерии подобия равны, то, следовательно, подобным процессам соответствует одно и то же критериальное уравнение. Таким образом,

подобные процессы описываются одинаковыми критериальными уравнениями. Равенство определяющих критериев есть существенное условие подобия, а равенство остальных критериев есть следствие подобия.

π -теорема дает правило для обработки эксперимента: для того, чтобы результаты данного эксперимента могли быть распространены на все подобные явления, их нужно записать в виде связи между критериями подобия.

Кроме того, при моделировании необходимо обеспечить подобие внешних форм. Это вытекает из требования подобия условий однозначности.

Рассмотрим возможность выполнения условий (8). Здесь $k_n = k_m$ (н – натура, м – модель). Для этого эксперимент необходимо проводить в воздухе. St указывает на выбор сходственных

$$\left. \begin{aligned} m_{EJ} = m_{GJ_p} = m_\rho m_l^4 m_v^2, \quad m_{J_{m0}} = m_\rho m_l^4, \\ m_{m0} = m_\rho m_l^2, \quad m_t = \frac{m_l}{m_v}, \quad m_\lambda = \frac{m_v}{m_l}. \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

Таким образом, при изготовлении модели реальной пластины должно быть обеспечено подобие натуре по распределению жесткости, распределению массы и по внешней форме в воздушном потоке.

Если материал модели совпадает с материалом реальной пластины в этом случае масштаб плотности $m_\rho = 1$ и формулы (9) упрощаются.

Если модель выполнена как копия натуре, то может так получиться, что толщина модели окажется очень малой. Для получения приемлемой толщины модели можно использовать для нее материал с более низким модулем упругости.

При продувке модели жесткость потока воздуха следует увеличивать постепенно до появления признаков потери упругой деформации. При этом фиксируют значение критической скорости $v_{крм}$. Далее, для натуре получают значения критической скорости потока воздуха:

$$v_{крн} = m_v v_{крм}. \quad (10)$$

Необходимо отметить, что масштабы физических величин с независимой размерностью (m_l , m_v , m_ρ) выбираются по желанию экспериментатора.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ АНАЛИЗ

В статье представлена методика разработки физической модели колебания пластины в потоке воздуха, которая, в свою очередь, является моделью реального пролета висячего моста. Методика выполнена при строгом изучении и применении законов и теорем механического подобия

Общий анализ сложных физических явлений методами подобия приводит к множеству критериев и многочисленным противоречивым требованиям к модели. В связи с этим число критериев должно быть сведено к минимуму. Для этого можно:

– исключить из рассмотрения физические характеристики, не имеющие существенного значения для изучаемого процесса (это наиболее важно);

– можно ограничить пределы исследования.

На практике удастся осуществить подобие лишь с той или иной степенью точности, то есть приближенно. Неточность моделирования возникает:

– из-за погрешностей в задании параметров оригинала и неточности воспроизведения в модели;

моментов времени в модели и в натуре. На основании критериев подобия получим масштабы определяющих величин

– при моделировании по критериям, найденным из упрощенных уравнений;

– из-за масштабного эффекта — несоответствия натурных наблюдений результатам пересчета модельных испытаний, так как при малых размерах модели практически невозможно соблюсти все условия полного подобия.

В общем случае физическое моделирование не ставит своей задачей получение результатов с определенной заданной точностью. Наиболее важно получить качественные зависимости определяемых параметров процесса исследования, которые должны служить опорной базой в дальнейшей проектной работе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Батрак А.П. – Планирование и организация эксперимента. Красноярск: ИПЦ СФУ, 2007г.
2. Блохин А.В. – Теория эксперимента. Научно-методический центр Электронная книга БГУ, 203г.
3. Бояршинова А.К., Фишер А.С. – Теория инженерного эксперимента. Челябинск, изд-во ЮУрГУ, 2006г.
4. Лавров В.В., Спиринов Н.А. – Методы планирования и обработки результатов инженерного эксперимента. Екатеринбург, ГОУ ВПО УГТУ.-УПИ, 2004г.
5. Санников Р.Х. – Теория подобия и моделирования. Уфа, УГНТУ, 2010г.
6. Чемодуров В.Т., Жига В.В. – Методы теории планирования эксперимента в решении технических задач. Симферополь, Изд «АРИАЛ», 2012г, 98-100с.
7. Чемодуров В.Т., Литвинова Э.В. – Моделирование систем. Симферополь, Изд «АРИАЛ», 2016г, 230с.
8. Штофф В.А. – Современные проблемы методологии научного познания. М., «Знание», 1975г.

REFERENCES

1. Batrak A. P. - planning and organization of experiments. Krasnoyarsk: SFU CPI, 2007.
2. Blokhin, A. V. – the theory of the experiment. Scientific and methodological center E-book of BSU, 203.
3. Boyarshinova A. K., Fischer A. S.-Theory of engineering experiment. Chelyabinsk, SUSU publishing house, 2006.
4. Lavrov V. V., Spirin N. A.-Methods of planning and processing the results of an engineering

experiment. Ekaterinburg, GOU VPO UGTU.- UPI, 2004.

5. Sannikov R. H.-theory of similarity and modeling. Ufa, UGNTU, 2010.

6. Chemodurov V.T., Zhigna V.V. 2012. Methods of the theory of experiment planning in solving

technical problems: monograph. - Simferopol, -98-100 p.

7. Chemodurov V.T., Litvinova E.V. 2016. System modeling: monograph. - Simferopol: IT "ARIAL", 230 p.

8. Shtoff V. A.-Modern problems of methodology of scientific knowledge. M., "Knowledge", 1975.

A METHOD FOR SIMULATING PHENOMENA OF AEROELASTICITY

Chemodurov¹ V.T., Kuzmenko² O.A., Khitruk³ S.A

Academy of Civil Engineering and Architecture (structural unit) KFU named after V.I. Vernadsky, Simferopol, st. Kievskaya, 181, Russia

e-mail: ¹chens_mu1@mail.ru, ²olya.kuzy@mail.ru, ³sergej.xitruk97@mail.ru

Summary. The material included in the article is a generalization of the authors' experience in the field of setting and conducting model tests of building structures. An integral part of the experiment is the theory of physical modeling, which gives the correct approach to the formulation and conduct of experiments.

The creation of construction structures of various classes and purposes is based on extensive preliminary research, among which, along with computational work, an important role is played by testing models of individual structural elements. In the article, based on the theory of physical modeling, the answer to two questions is given:

- how to create a model, choose a real object (hanging mota);

- how to recalculate the results of the experiment on the object under study.

Key words: Physical (mechanical) model, similarity criterion, dimension theory, mechanical similarity, scale effect, dimensionless complexes of physical quantities.