

К ВОПРОСУ О РЕШЕНИИ ЗАДАЧ МЕХАНИКИ С ПОМОЩЬЮ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Гаркави Наум Яковлевич

пенсионер, г.Днепропетровск, Украина

Ковалёв Игорь Ефимович

пенсионер, г.Днепропетровск, Украина

Горобец Владимир Леонидович

*доктор техн. наук, главный научный сотрудник Днепропетровского
национального университета железнодорожного транспорта им. академика*

В.Лазаряна, г.Днепропетровск, Украина

Фёдоров Евгений Фёдорович

*зав. лаб. Днепропетровского национального университета железнодорожного
транспорта им. академика В.Лазаряна, г.Днепропетровск, Украина*

Карпенко Владимир Владимирович

*ст. науч. сот. Днепропетровского национального университета
железнодорожного транспорта им. академика В.Лазаряна, г.Днепропетровск,
Украина*

Клименко Ирина Владимировна

*канд. техн. наук, доцент Днепропетровского национального университета
железнодорожного транспорта им. академика В.Лазаряна, г.Днепропетровск,
Украина*

Маслеева Людмила Григорьевна

*канд. техн. наук, доцент Днепропетровского национального университета
железнодорожного транспорта им. академика В.Лазаряна, г.Днепропетровск,
Украина*

Шадрин Илья Сергеевич

*кандидат медицинских наук, врач-хирург Клинического объединения «Скорая
медицинская помощь», г.Днепропетровск, Украина*

Сахно Анатолий Никитович

*кандидат медицинских наук, врач высшей категории, заслуженный врач
Украины, врач-хирург Клинического объединения «Скорая медицинская помощь»,
г.Днепропетровск, Украина*

В начале 20-го века В.Л. Кирпичёв пропагандировал способ решения инженерных задач при помощи моделей, которые «не представляют точную картину физического явления», а только «наводят на мысли и предположения о возможных явлениях». Сейчас этот способ незаслуженно потерял популярность. Статья посвящена решению при помощи моделирования «по В. Л. Кирпичёву» двух задач из разных областей знаний: одна задача посвящена динамике ракет с ЖРД, вторая — хирургии пилородуоденальной язвы.

Ключевые слова: натурные испытания, численный эксперимент, математическая модель, лицензионный специализированный программный комплекс, модель-ассоциация.

На початку 20-го століття В.Л. Кірпічов пропагував спосіб розв'язання задач за допомогою моделей, що «не представляють точну картину фізичного явища», а тільки «наводять на думки і припущення про можливі явища». Зараз цей спосіб незаслужено втратив популярність. Стаття присвячена розв'язанню за допомогою моделювання «по В.Л. Кірпічову» двох задач з різних областей знань: одна задача присвячена динаміці ракет із РРД, друга - хірургії пилородуоденальної виразки.

Ключові слова: натурні випробування, числовий експеримент, математична модель, ліцензійний спеціалізований програмний комплекс, модель-асоціація.

At the beginning of 20 century V.L. Kirpichyov propagandized the way of the decision of the engineering problems at models, which «do not present the exact picture of the physical phenomena», but only «direct to thoughts and suggestions about possible phenomenas». At present this way has undeservedly lost the popularity. This article is dedicated to use of modeling «by V.L. Kirpichyov» for two problems from different areas of knowledges: one problem is dedicated to track record of the rockets with the liquid jet engine, the second — to the surgery of the pyloroduodenal canker.

Keywords: test on nature, the numerical experiment, mathematical model, license specialized programme complex, model-assotiation.

Постановка проблемы в общем виде

В последнее время некоторыми авторами [5,6] и даже нормативной литературой [9] настоятельно рекомендуется использовать для решения задач механики компьютерное моделирование, а для компьютерного моделирования - лицензионные версии специализированных программных комплексов. При этом подразумевается, что лицензионные программы достаточно полно и адекватно

отображают поведение исследуемых систем в ограничениях, наложенных эксплуатационными требованиями. Зачастую такой подход к моделированию целесообразен (т.е. не спровоцирован эйфорией от нескольких полученных результатов или конъюнктурными соображениями). Однако, достаточно часто для решения задач, возникающих у специалистов различного профиля, до сих пор остаётся полезным подход к моделированию, предлагавшийся в своё время В.Л. Кирпичёвым, который считал возможным использовать модели, которые не представляют «точную картину физического явления», но «наводят на мысли и предположения о возможных явлениях» [1, с.369]. В оправдание тезиса о целесообразности при решении некоторых задач использовать такие «нестрогие» модели (модели-ассоциации [4, с.42]) ниже приводятся два примера, когда по разным причинам моделирование в смысле В.Л. Кирпичёва оказалось практически единственным возможным.

Отметим, что обе приведенные ниже задачи решались, как задачи механики.

Постановка задачи 1*

При стендовых виброиспытаниях низкоуровневым вибровозбуждением [2, с.53] геометрически подобной модели проектируемой ракеты-носителя, первая ступень которой представляет собой достаточно сложную пространственную конструкцию (прототип ракеты-носителя «Энергия»), отмечалось количество резонансов, намного большее, чем количество основных форм колебаний, найденное при моделировании на аппаратно-программном комплексе NOVA. Кроме того, при одной, но вполне определённой частоте вибровозбуждения вблизи стола вибростенда слышался шум текущей воды. Задача 1 посвящена объяснению отмеченных эффектов.

Решение задачи 1

В целях объяснения столь большого количества резонансов показалось уместным допустить, что одной и той же форме колебаний иногда может соответствовать несколько собственных частот [3, с.10,13,14]. Для подтверждения

или опровержения этой гипотезы использовалась натурная модель-ассоциация, представляющая собой конструкцию, состоящую из гнутой в валках, а затем сваренной вдоль своей образующей цилиндрической оболочки с изготовленными из толстого листового металла массивными днищами, присоединенными к оболочке посредством обечаек. У этой конструкции значительно меньше основных форм колебаний, чем у исходного объекта, а для определения форм колебаний такой конструкции можно использовать виброшуп.

Теоретически описанная выше модель-ассоциация, закреплённая днищем на столе вибратора, должна иметь одну собственную частоту, соответствующую первой форме колебаний цилиндрической оболочки, вторую собственную частоту (примерно в два раза выше первой), соответствующую второй форме колебаний оболочки, и т.д.

Результат моделирования.

Фактически при стендовых испытаниях модели-ассоциации медленно сканируемым по частоте вибровозбуждением в весьма широком диапазоне частот проявлялись резонансы, соответствующие первой форме колебаний оболочки. Каждая частота соответствовала этой форме резонансных колебаний вдоль различных образующих цилиндрической поверхности, что обусловлено наличием на оболочке разнообразных рёбрышек, наклёпов и сварного шва, а также другими неоднородностями конструкции. Интересно, что вторые формы колебаний вдоль некоторых образующих цилиндрической поверхности возбуждались на более низких частотах, чем первые формы колебаний вдоль других образующих этой же цилиндрической поверхности [3, с.10].

Таким образом, в результате моделирования гипотеза о том, что в связи с различными нарушениями симметрии «одной и той же» форме колебаний может соответствовать несколько собственных частот, с помощью описанной выше модели-ассоциации была подтверждена.

Продолжение решения задачи 1

С целью заглянуть во время эксперимента внутрь не полностью заполненного жидкостью сосуда использовалась вторая модель-ассоциация, представляющая собой на $3/4$ по высоте заполненную водой склеенную из нетолстого плексигласа усечённую пирамиду с массивными металлическими днищами, укреплённую меньшим днищем на столе вибростенда.

Результат моделирования на второй модели-ассоциации.

При высоком (для данной модели) уровне вибровозбуждения наблюдался следующий эффект [2, с.53]. В местах пучностей колеблющейся оболочки имело место «виброкипение» жидкости; над поверхностью при этом иногда возникали фонтанчики, провоцирующие низкочастотные колебания поверхности жидкости**, которые в свою очередь иногда вызывали низкочастотные колебания стола вибростенда с большими амплитудами вертикальных перемещений. Очевидно, если подобные колебания возникнут в моделируемом объекте, то они могут вызвать неустойчивость ракеты на траектории [2, с.53]. Отметим, что подобные низкочастотные колебания поверхности жидкости, как выяснилось в экспериментах на моделях-ассоциациях, вследствие нарушений симметрии оболочки могут возникнуть в широком диапазоне частот вибровозбуждения.

Резюме к задаче 1

1. В стендовых испытаниях исследуемой системы было обнаружено неожиданно большое количество резонансных частот. Формы резонансных колебаний определить не удалось из-за сложности испытываемой системы. После стендовых испытаний крайне примитивной модели-ассоциации удалось понять, что большое количество резонансных частот с тяжело различимыми формами явилось следствием нарушений симметрии исследуемой системы. Нарушения симметрии в свою очередь неизбежны при использованной технологии изготовления оболочек.

2. Описанный эффект, связанный с виброкипением жидкости, без натурального эксперимента на модели-ассоциации зафиксировать было бы не возможно (во всяком случае, данный эффект возникает за пределами идеализации всех существовавших на тот момент математических моделей колебаний оболочек, частично заполненных жидкостью).

3. Моделирование производилось с точностью до гипотетической возможности возникновения описанных эффектов в проектируемом изделии.

Постановка задачи 2

В хирургии пилородуоденальной язвы в последние годы была разработана методика создания спиралевидной «шпоры-клапана» со щелевидным дугообразным каналом пилоропластики [8] как дополнение стволовой ваготомии (при проталкивании содержимого желудка через «шпору» щелевидное сечение канала может превращаться в круглое). При разработке методики требовалось определить, на сколько возможно и целесообразно перекрыть просвет пилородуоденальной зоны «шпорой-клапаном», чтобы не вызвать механического препятствия её проходимости (и таким образом исключить рвоту, связанную с переполнением желудка). Задача инженеров-механиков заключалась только в определении площади отверстия; форму и длину «шпоры-клапана», исключающего заброс жёлчи в желудок, хирурги вынуждены конструировать из неизъязвлённых фрагментов имеющегося материала. Естественно, никаких лицензионных программных комплексов для решения поставленной задачи не существовало, т.к. сама методика только разрабатывалась.

Решение задачи 2

Пройодимость и клапанирование пилородуоденальной зоны здорового человека определяется перистальтикой и разностью давлений в желудке и двенадцатиперстной кишке. Для оценки проходимости «шпоры-клапана» при помощи «нестрогой» модели было взято время эвакуации сульфата бария из желудка в двенадцатиперстную кишку под собственным весом (без учёта

перистальтики и разности давлений). Желудок в этой модели представлялся в виде ступенчатой призмы. Процесс вытекания суспензии из сосуда под собственным весом наблюдался на модели-ассоциации, представляющей собой призму постоянного сечения.

Натурный эксперимент.

Из гидравлики [10, с.823] известно, что время опорожнения сосудов постоянного сечения описывается выражением

$$t = \sqrt{\frac{2H}{g}} \cdot \frac{1}{\mu} \cdot \frac{S_{\text{дна}}}{S_{\text{дыр}}} \quad (1)$$

Здесь H - высота уровня жидкости в сосуде относительно выходного отверстия, $g=9,8 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения, μ – коэффициент расхода, $S_{\text{дна}}$ - площадь сечения сосуда, $S_{\text{дыр}}$ - площадь выходного отверстия. В экспериментах использовался цилиндрический сосуд внутренним диаметром $D=75 \text{ мм}$. Водная суспензия BaSO_4 занимала сосуд до высоты $H=43 \text{ мм}$. Очевидно, $S_{\text{дна}} = \pi \frac{D^2}{4} = 4416 \text{ мм}^2$, а объем суспензии $V \approx 190 \text{ мл}$. Рекомендациям справочника [10, с.820] не противоречит значение $\mu \approx 0,6$.

Интересно отметить, что водная суспензия BaSO_4 ведет себя не совсем, как жидкость. Так через выходное отверстие диаметром $d_{\text{дыр}}=1,25 \text{ мм}$ вытекла одна капля суспензии, после чего отверстие забилося. Через отверстие диаметром $d_{\text{дыр}}=3,25 \text{ мм}$ вытекла практически вся суспензия (на дне сосуда осталось в виде белого налёта незначительное количество BaSO_4). Однако, после $t_1 \approx 75$ секунд достаточно равномерное истечение суспензии перешло в капание. После лёгкого прикосновения к сосуду равномерное течение суспензии возобновилось. Согласно выражению (1) ожидалось время истечения $t \approx 83 \text{ с}$, фактическое же (с учётом капания) время истечения основной массы суспензии из сосуда было $t \approx 97 \text{ с}$.

Диаметр $d_{\text{дыр}}=5$ мм практически гарантирует «незабиваемость» выходного отверстия (при истечении суспензии из сосуда под собственным весом).

Численный эксперимент.

Очень упрощённо желудок можно представить в виде ступенчатой призмы, состоящей из верхней прямоугольной призмы длиной $L_1 \approx 100$ мм, шириной b , высотой $H_1 \approx 50$ мм и нижней прямоугольной призмы длиной $L_2 \approx 200$ мм, шириной b , высотой $H_2 \approx 50$ мм. Допустим, что 200 мл выпитой больным суспензии добавились к 500 мл находящегося в желудке желудочного сока. Таким образом, $(5[\text{см}] \cdot 10[\text{см}] + 5[\text{см}] \cdot 20[\text{см}]) \cdot b = 700[\text{см}^3]$. Откуда $b = \frac{700}{150} = 4,66$ см. При

$d_{\text{дыр}}=5$ мм площадь «округлившегося» выходного отверстия

$S_{\text{дыр}} = \frac{\pi}{4} (5 \cdot 10^{-3} [\text{м}])^2 \approx 19,7 \text{ мм}^2$. Очевидно, что часть суспензии, попавшая на «дно»

антрального отдела желудка и находящаяся ниже выходного отверстия, сама собой из желудка не вытечет. Находящаяся выше отверстия жидкость вытечет из желудка не позже, чем через

$$t = \frac{b \cdot \sqrt{2}}{m \cdot S_{\text{дыр}} \cdot \sqrt{g}} \left(\sqrt{H_1 + H_2} \cdot L_1 + \sqrt{H_2} \cdot (L_2 - L_1) \right) = 115 \text{ с},$$

что не должно вызывать застойных явлений.

Результат моделирования.

Чтобы заброса жёлчи в желудок не было, размер выходного отверстия «шпоры-клапана» должен быть достаточно мал. Для полноценной проходимости клапана (для гарантированного отсутствия забиваемости) диаметр «округлившегося» выходного отверстия должен быть не менее $d_{\text{дыр}}=5$ мм.

Замечания.

Очевидно, что описанное выше моделирование не корректно. Человек после принятия пищи не обязательно будет стоять. Он может лечь... Сечение «шпоры» не круглое. Оно может «округлиться» только при проталкивании через «шпору»

содержимого желудка. Давление газов в желудке и двенадцатиперстной кишке — различное. У здорового человека обычно имеет место «присасывающее действие» двенадцатиперстной кишки по отношению к желудку. При отсутствии клапана жёлчь в желудок не попадает, что может повлиять на газообразование и соответственно давление газов в желудке. При движении по «шпоре» содержимое желудка должно испытывать сопротивление движению, большее, чем при истечении через отверстие...

В своё время Н.Е. Жуковский писал, ссылаясь на того же самого В.Л. Кирпичёва, что «для инженера нет неразрешимой задачи» [7, с.129] (в том смысле, что инженер не имеет права не решить поставленную перед ним задачу). Другое дело, что предлагаемое инженерное решение можно последовательно уточнять или исправлять...

Отметим, что размер отверстия «шпоры» хирург определяет наощуп подушечкой пальца, что тоже влияет на необходимую хирургу точность определения диаметра округлившегося отверстия «шпоры-клапана».

Исходя из всего, сказанного выше, в качестве «нулевого приближения» можно «постановить», что диаметр округлившегося отверстия «шпоры-клапана» должен быть не меньше 5 мм.

Как выяснилось в дальнейшем, этой точности определения диаметра хирургу оказалось достаточно.

Клинические результаты.

Проведенные контрольные осмотры 12 больных в сроки от 6 месяцев до 1,5 лет после операции показывают, что на ФГДС клапанность пилоропластики сохраняется, заброса жёлчи в желудок у девяти пациентов нет, а у трёх наблюдается только при надавливании в правом подреберье. Визуально просветы желудка и двенадцатиперстной кишки разобщены, явления антрум-гастрита не выражены.

Резюме к задаче 2

1. Для корректного решения задачи необходимо имитировать работу прооперированных желудка и двенадцатиперстной кишки. Вместо этого на крайне примитивных натурной и численной моделях-ассоциациях было определено:

1) что под собственным весом вытекающей суспензии BaSO_4 не забивается круглое отверстие диаметром 5 мм и более;

2) что эвакуация под собственным весом 200 мл суспензии из желудка, заполненного 500 мл желудочного сока (ситуация достаточно экзотическая, но «в запас»), произойдёт примерно за 115 сек., т.е. за время, меньшее, чем обычно необходимо больному до начала рвоты, связанной с переполнением желудка.

2. Исходя из сказанного выше, предположили, что минимальный диаметр «округлившегося» выходного отверстия «шпоры-клапана» должен быть не менее 5 мм. Что и подтвердилось наблюдением за прооперированными больными в сроки до 1,5 лет.

Выводы

1. Эксперименты на достаточно подробной модели исследуемого объекта (в том числе, и на подробной математической модели) не всегда вызывают интересующий исследователя эффект потому, что данный эффект может находиться за пределами идеализации, являющейся моделью, на которой ставится эксперимент (численный или натурный).

2. Для объяснения причин, породивших в натурном эксперименте исследуемого объекта неожиданное для испытателя явление, использование моделей-ассоциаций безусловно целесообразно. При этом модели-ассоциации создаются, исходя из гипотез о причинах, порождающих это явление.

3. Использование моделей-ассоциаций иногда позволяет оценить границы, в которых лежит рациональное решение поставленной задачи.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Бесѣды о механикѣ В.Л. Кирпичёва. – С.-Петербургъ: Изданіе К.Л. Риккера, 1907. – 371 с.
2. Гаркави Н.Я., Добров И.В. О способах имитации вибрационного состояния объектов. // Вестник машиностроения. – М.: «Издательство “Машиностроение”», США: «Аллертон Пресс», 1999. - №4. - С.52-54.
3. Гаркави Н.Я., Добров И.В. Система измерений динамических характеристик механических конструкций при виброиспытаниях. // Вестник машиностроения. – М.: «Издательство “Машиностроение”», США: «Аллертон Пресс», 2002. -№3. - С.10-14.
4. Гаркави Н.Я., Литвиненко О.Н., Добров И.В. К вопросу о формализации физического моделирования поведения механических конструкций на подобных моделях. // Вібрації в техніці та технологіях. Всеукраїнський науково-технічний журнал. – 2005. - №4(42). - С.39-44.
5. Грищенко С.Г. Випробування та допуск до експлуатації нового залізничного рухомого складу. // Вісник Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля. — 2009. — №4(134) — Ч.2. —С.114-118.
6. Дёмин Ю.В., Дёмин Р.Ю., Черняк А.Ю. Математическое моделирование и динамика подвижного состава железных дорог. // Залізничний транспорт України. — 2007. — №4. — С.3-8.
7. Жуковский Н.Е. Самолёт, автомобиль, паровоз в теории Жуковского. /Подготовка Козловой С // Мир транспорта. – М.: Московский государственный университет путей сообщения (МИИТ), 2006. – №3. - С.128-135.
8. Мунтян С.О., Сахно А.М., Шадрін І.С. Спосіб спіралеподібної пілородуоденопластики. / Патент на винахід №79043 від 10.05.2007.
9. Рекомендації щодо розрахунків та безпосередніх вимірювань сил взаємодії коліс і рейок для визначення запасу стійкості колісної пари від сходу з рейок з метою підвищення безпеки руху поїздів. – Київ: Укрзалізниця, 2008. – 140 с.

10. Справочник машиностроителя. Т.1. /Председатель редакционного Совета
Чудаков Е.А. - М.: Машгиз, 1953. - 1036 с.

В испытаниях принимали участие Л.К. Клобукова (Батурина),
А.В. Красников, Н.З. Мостовой, В.Н. Тараненко, А.Ф. Францев, Д.Д. Мехов
Б.С. Дробязко .

Похожие результаты независимо были получены в ЦАГИ М.С. Галкиным и
оформившими открытие этого эффекта учёными США.