

О.А. Халтурин, А.И. Лурье

Пермский государственный технический университет

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА СВИНЧИВАНИЯ КОНИЧЕСКОГО РЕЗЬБОВОГО СОЕДИНЕНИЯ

Приведена математическая модель рабочей поверхности конической резьбы, выполненной с погрешностями, полученная с помощью разложения профиля треугольной резьбы в тригонометрический ряд. Приведена методика моделирования свинчивания резьбового соединения без приложения момента свинчивания и описано программное обеспечение, реализующее ее для типоразмеров резьб МК, РКТ, РК, З_{СП} по ОСТ 39–226–91. Проанализированы возможности модели по оценке влияния отклонений параметров резьбы на величину осевого натяга в резьбовом соединении на примере резьбы МК-94х41:32.

Моделирование профиля конической резьбы [1, 2, 3] убедительно показало широкие возможности такого подхода к выявлению и оценке влияния различных факторов на конечные результаты формообразования резьбы. Это в значительной мере позволяет рационально нормировать требования к точности оборудования, инструмента, наладки и общей подготовке процесса резьбообработки.

Профиль конической треугольной резьбы определяется сочетанием ее параметров: среднего радиуса, половины угла профиля, конусности и шага резьбы. Для описания такого профиля разработана методика аппроксимации осевого сечения профиля треугольной резьбы (ее рабочего участка) с помощью разложения его в тригонометрический ряд Фурье [1]. В общем виде уравнение профиля резьбы в осевом сечении (в декартовой системе координат) выглядит следующим образом:

$$y(x) = R_{\text{cp}} + x \operatorname{tg} \varphi + 2 \operatorname{tg} \left(\frac{\pi - \alpha}{2} \right) P \sum_{k=0}^3 \frac{\sin \left[(2k+1) \frac{2\pi x}{P} \right] (-1)^k}{[(2k+1)\pi]^2},$$

где R_{cp} – радиус среднего конуса в основной плоскости (основная плоскость лежит в начале координат);

φ – угол конусности (половина угла конуса) резьбы;

α – угол профиля резьбы;

P – шаг резьбы.

В дальнейшем были исследованы возможности такого подхода к моделированию конических резьб различных типоразмеров, параметры которых регламентированы ОСТ 39–226–91 [3]. Расчеты показали некоторые отклоне-

ния результирующего профиля от построенного геометрически в соответствии с процессом формообразования резьбы при нарезании резцом (шлифовальным кругом) в результате чего была проведена доработка модели. Также был совершен переход к трехмерной модели в цилиндрических координатах с выделением рабочего участка профиля резьбы (без описания дна канавки).

В итоге для резьбы ниппеля (муфты) с действительным шагом P , отклонением шага ΔP , углами профиля α , отклонением от перпендикулярности θ и конусности φ , средним радиусом Rco и радиусом гладкой части Rt в начале координат закон, описывающий профиль резьбы в цилиндрических координатах x и ω , можно представить в следующем виде:

$R(Rco, P, \Delta P, \alpha, \theta, \varphi, Rt, x, \omega) =$ наименьшему (наибольшему) из:

$$Rco + \left[\text{round} \left(\frac{x}{P} + \frac{\omega}{2\pi} \right) - \frac{\omega}{2\pi} \right] P \text{tg}(\varphi) - \frac{P}{4} \text{tg} \left(\frac{\alpha}{2} \right) \text{tg}(\varphi)^2 + \frac{\Delta P}{4} \text{ctg} \left(\frac{\alpha}{2} \right) +$$

$$+ 2P \text{tg} \left(\frac{\pi - \alpha}{2} \right) \sum_{k=1}^n \frac{\sin \left[k \frac{\pi}{2} \left(1 + \frac{\theta}{0,433} \right) \right] \sin \left[2\pi k \left(\frac{x}{P} + \frac{\omega + 0,5\pi}{2\pi} \right) \right]}{\pi^2 k^2 \left[\frac{1}{4} - \left(\frac{\theta}{0,433} \right)^2 \right]}$$

и

$$Rt + x \text{tg}(\varphi).$$

Отобразим графически полученную поверхность для участка резьбы ниппеля начальным диаметром 32 мм, шагом 4 мм, углом профиля 60° и конусностью 1:4 (рис. 1).

В результате получена функция, описывающая рабочий участок профиля резьбы. Точность аппроксимации зависит от размеров резьбы (в основном – от шага, как масштабного коэффициента) и количества членов ряда Фурье. При максимальном для резьб по ОСТ 39–226–91 шаге 6,35 мм и количестве членов ряда, равном 10, наибольшее отклонение аппроксимированного профиля в пределах рабочего участка в радиальном направлении будет составлять 4 мкм.

Описание методики свинчивания. Процесс свинчивания моделируется путем пошагового совмещения профилей муфты и ниппеля, полученных по представленной выше модели, до такого состояния, после которого дальнейшая затяжка соединения без деформаций резьбовых поверхностей невозможна. Совмещение производится путем осевого перемещения и вращения профиля ниппеля при неподвижном профиле муфты, не допуская проникновения профиля ниппеля в профиль муфты в соединении, при этом выходным параметром модели является осевой натяг, как разность положения основных плоскостей деталей (т.е. для полностью свинченной годной резьбы он будет равен нулю).

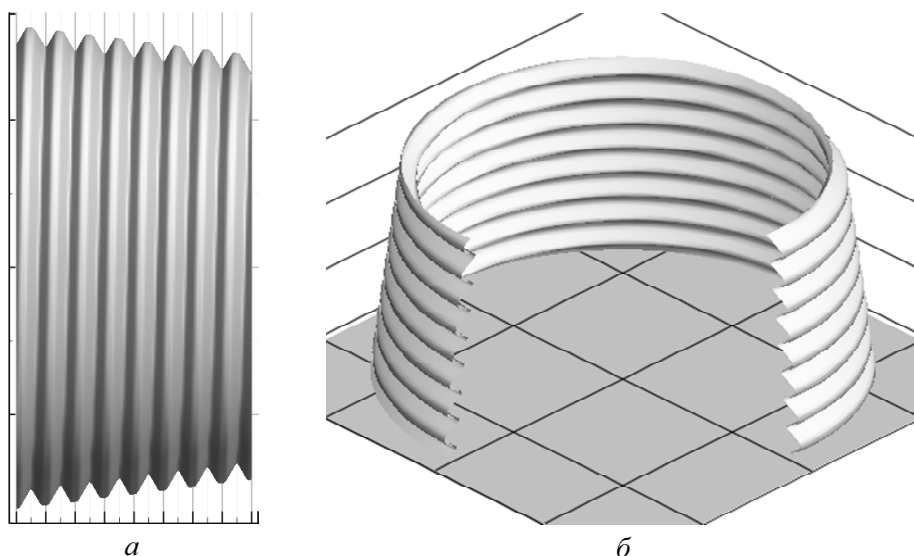


Рис. 1. Объемное изображение поверхности резьбового соединения:
a – в профиль; *б* – с вырезом четверти

Процесс свинчивания условно разбит на три этапа. Длительность этих этапов зависит от сочетания величин отклонений параметров резьб ниппеля и муфты.

Этап I. Предварительный этап, во время которого осуществляется введение ниппеля в муфту до упора. Происходит на том участке, где величина наружного диаметра ниппеля меньше внутреннего диаметра муфты. Соприкосновением считается зазор-натяг 0,01 мм.

Этап II. Целошаговое ввинчивание ниппеля. Реализуется как продвижение профиля ниппеля на один шаг его резьбы с коррекцией положения ниппеля. Коррекция заключается в смещении профиля ниппеля в сторону, противоположную той, с которой образовался диаметральный натяг, т.е. возникает эффект скольжения боковой поверхности ниппеля по боковой поверхности муфты. Этап продолжается до тех пор, пока не возникнет диаметральный натяг по обеим сторонам профиля, при этом происходит возврат на одну итерацию.

Решение о продолжении ввинчивания, корректировке или окончании этапа принимается на основании сочетания минимальных зазоров-натягов по обеим сторонам профиля. Во время каждой итерации могут возникать следующие варианты сочетания профилей муфты и ниппеля:

- зазор по обеим сторонам (рис. 2, *a*);
- натяг по обеим сторонам (рис. 2, *б*);
- натяг по одной стороне (рис. 2, *б, в*).

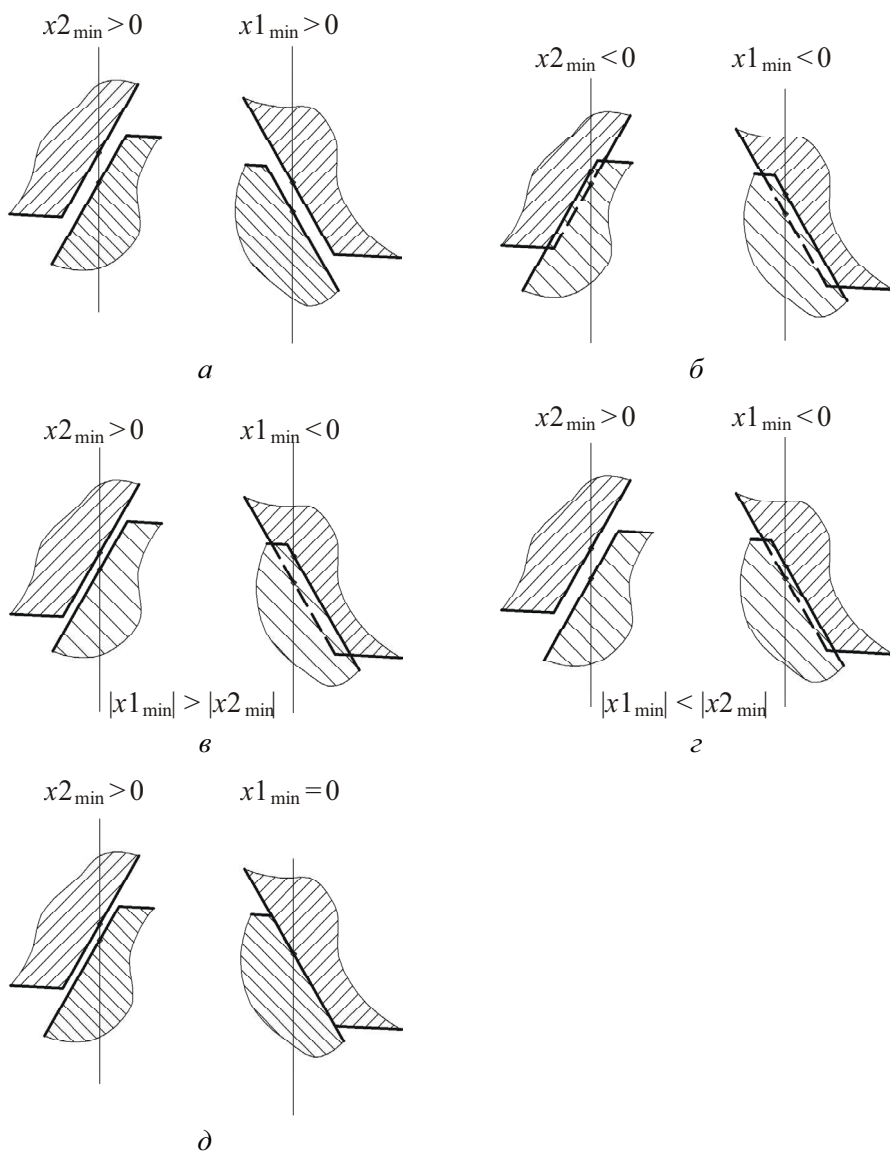


Рис. 2. Сочетание профилей муфты и ниппеля

В первом случае ввинчивание продолжается, во втором – делается шаг назад и происходит переход к третьему этапу. В третьем варианте возможны два случая: когда величина натяга по одной стороне больше зазора по другой (рис. 2, г), этот случай приравняем к варианту с двойным натягом, и самый распространенный вариант – когда натяг меньше зазора (рис. 2, б), в данном случае возможна коррекция осевого положения ниппеля на величину, пропорциональную натягу (рис. 2, в), и дальнейшее ввинчивание (эффект скольжения).

Этап III. Поиск оптимального положения. На этом этапе происходит ввинчивание ниппеля путем задания смещения как в осевом направлении, так и по углу положения. Работа модели свинчивания на третьем этапе аналогична работе на втором, с некоторым увеличением числа действий. При выявлении в соединении ситуации, при которой на втором этапе принималось решение о завершении цикла, здесь происходит откат на одну итерацию и уменьшение шага ввинчивания вдвое с последующим возобновлением цикла. Цикл ввинчивания третьего этапа прерывается, когда величины зазора-натяга по обеим сторонам не будут превышать 0,001 (допускается проникновение ниппеля в муфту на 1 мкм в радиальном направлении).

Выходным результатом процесса свинчивания является смещение основной плоскости ниппеля относительно основной плоскости муфты, также программой индицируется угол поворота ниппеля вокруг своей оси.

С целью реализации изложенных алгоритмов была разработана компьютерная программа по определению осевого натяга в резьбовом соединении при различных параметрах муфты и ниппеля. Программирование велось в среде Borland Delphi. Интерфейс программы (рис. 3) содержит элементы управления, предназначенные для ввода и вывода данных, а также визуализации процесса свинчивания.

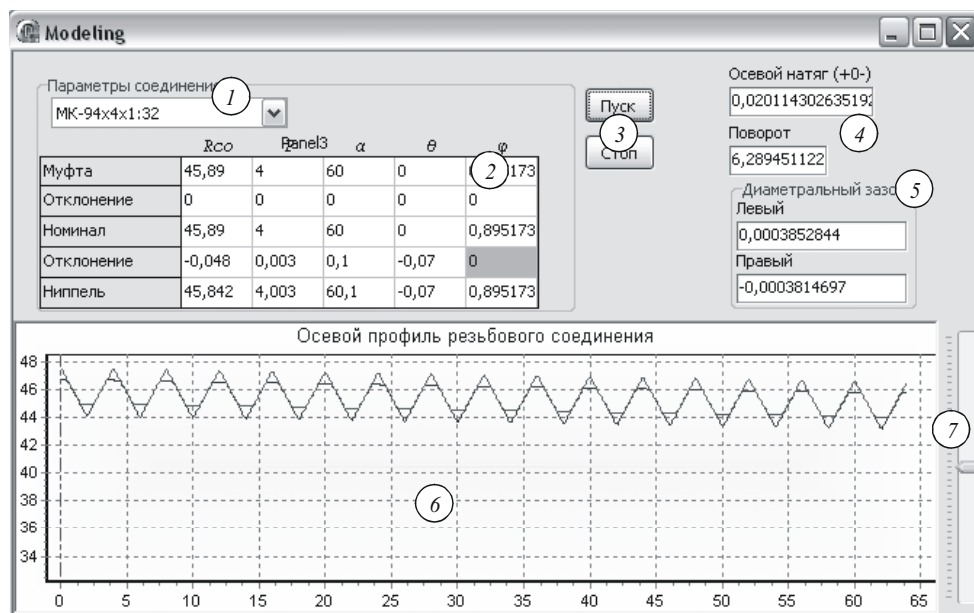


Рис. 3. Интерфейс программы:

- 1 – список типоразмеров резьб; 2 – таблица ввода размеров и отклонений;
- 3 – кнопки запуска и останова расчета; 4 – параметры положения ниппеля;
- 5 – значения минимальных зазоров; 6 – график осевого сечения соединения;
- 7 – движок смены угла осевого сечения

Порядок работы программы можно представить в виде алгоритма (рис. 4).

Таблица с необходимыми для расчетов размерами муфты и ниппеля содержится в отдельном текстовом файле «Размеры.csv», включающем в себя строки записи, поля которых разделены точкой с запятой. Первая строка содержит наименование полей записи, последующие – записи с параметрами резьбы. Приведем фрагмент файла «Размеры.csv» (первые две строки):

```
Обозначение;Шаг;Конусность;g;dcp;двнМ;днарН;L  
РКТ 171x6,3x1:12;6,35;1:12;15,875;166,379;163,081;169,677;120
```

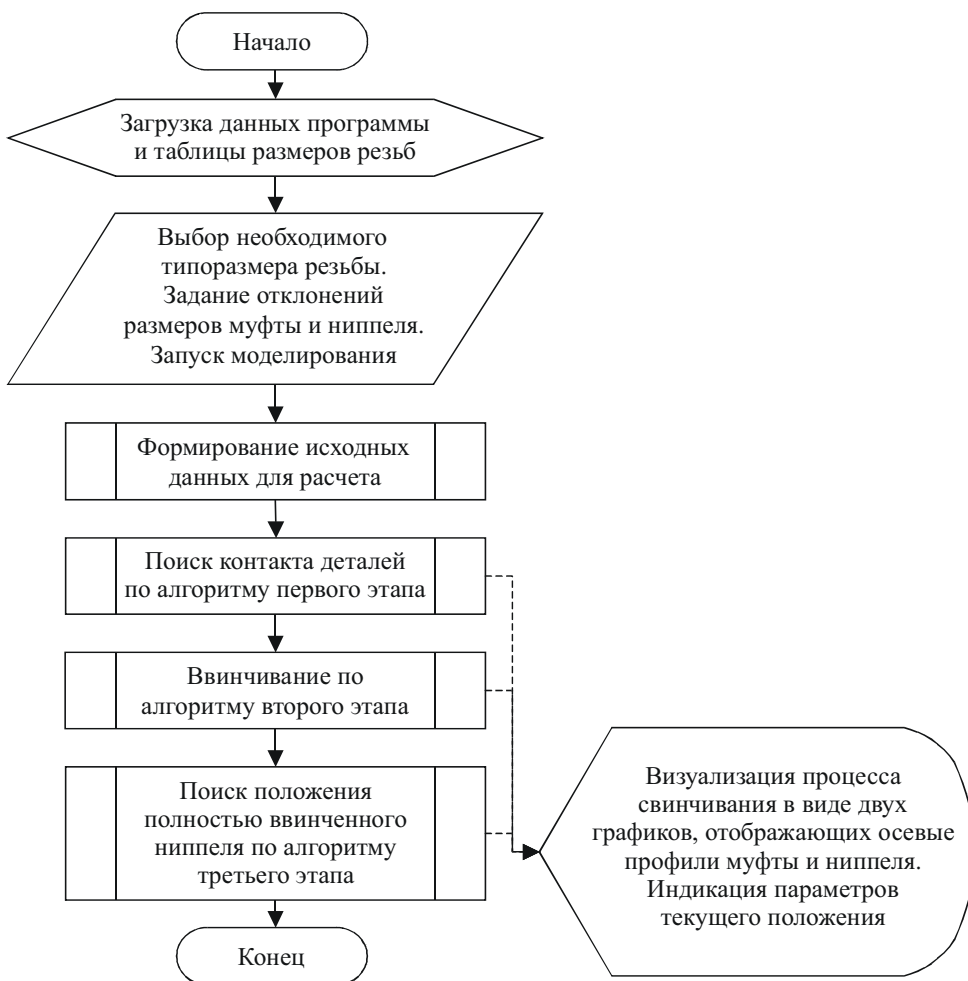


Рис. 4. Алгоритм работы программы

При запуске программы или выборе типоразмера из списка 1 (см. рис. 3) происходит перенос данных в среднюю строку таблицы 2. Ввод отклонений размеров производится в соответствующие поля таблицы 2. Ввод угловых значений производится в угловых градусах с десятичными долями. Кроме того, возможен непосредственный ввод размеров деталей. Перерасчет размеров (отклонений) на основе отклонений (размеров) и номинальных параметров резьбы происходит по повторному нажатию клавиши клавиатуры «Ввод».

Вывод данных об осевом и круговом положении ниппеля производится на всем протяжении расчета. Во время расчета положение отображаемого осевого сечения можно изменять с помощью движка 7 с шагом 10°.

Исследование зависимости натяга от параметров резьбы при помощи модели. Рассмотрим работу модели на примере резьбы типоразмера МК 94×4×1:32. Для уменьшения количества вариаций будем свинчивать ниппель с идеальной муфтой (резьбовой калибр). Изменение параметров резьбы будем производить в пределах допусков, установленных в ОСТ 39–226–91. Для параметров с двухсторонними отклонениями возьмем 7 уровней, а для угла конусности – 4 (таблица).

Значение параметров резьбы

Параметр	Обозначение	Номинал	Минимальное значение	Максимальное значение
Шаг, мм	P	4	3,997	4,003
Угол профиля, °	α	60	59,667	60,333
Отклонение от перпендикулярности, °	θ	0	-0,333	0,333
Угол конусности, °	ϕ	$\text{atg}\left(\frac{1}{2 \cdot 32}\right) = 0,895$	0,835	0,895

После проведения серии численных экспериментов были получены наборы данных, показывающих зависимость величины осевого натяга от параметров резьбы (рис. 5). Как и ожидалось, зависимости носят линейный характер ($R^2 = 0,998-1,000$). Отдельно стоит отметить несимметричную зависимость от шага и угла профиля (рис. 5, а, б). Наибольшее влияние из всех параметров показали шаг и конусность (рис. 5, а, б), что объясняется зависимостью их воздействия от длины резьбового соединения.

Однако в реальности одновременно все параметры резьбы имеют те или иные отклонения от номинальных, и интересно рассмотреть характер влияния на осевой натяг сочетания параметров. Возьмем для удобства шаг и угол конусности. Параметры будем варьировать на тех же уровнях, получая план полного двухфакторного эксперимента виде матрицы 7×4. Полученный результат представлен в виде срезов поверхности по уровням (рис. 6). При

этом на рис. 6, *а* показаны все уровни угла конусности, а на рис. 6, *б* – только четыре уровня шага. При этом имеется разметка маркерами отображенных уровней шага. При внимательном рассмотрении графиков на рис. 6 можно определить, что зависимость носит характер ломаной плоскости. Участки графиков на разных уровнях параллельны друг другу и явно имеют точки перелома, лежащие на двух прямых, проходящих через точку с номинальными значениями шага и угла конусности (4 мм и 0,895°).

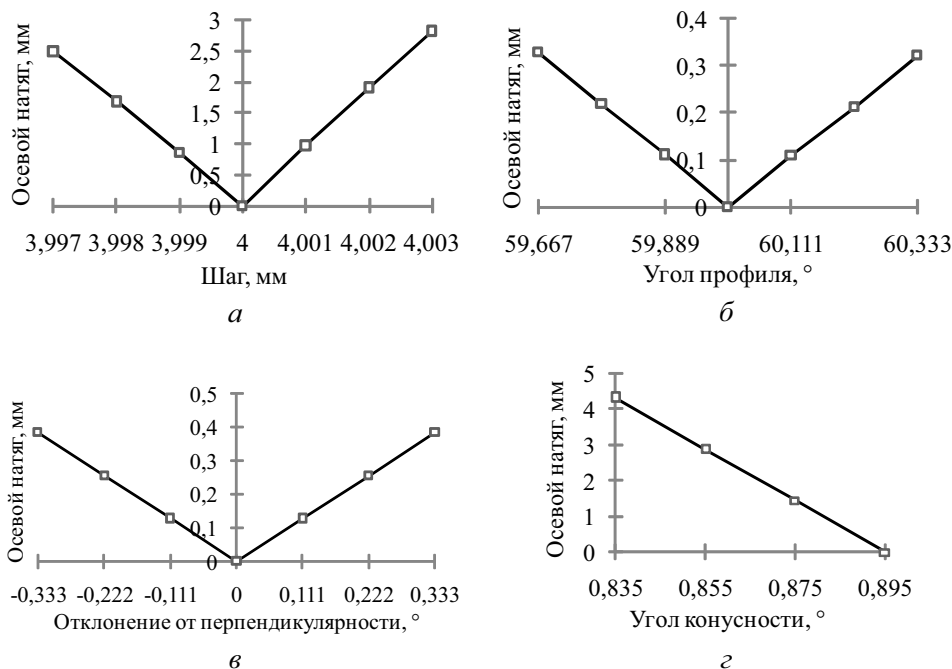


Рис. 5. Зависимость величины осевого натяга от параметров резьбы

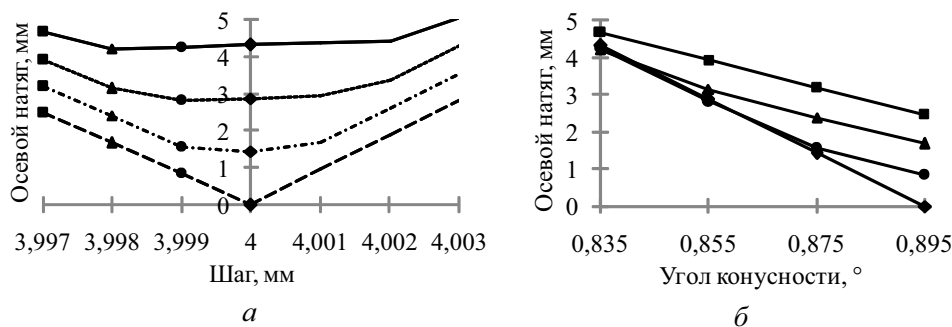


Рис. 6. Комплексная зависимость величины осевого натяга от шага и угла конусности (графики по углу конусности показаны при половине уровней шага)

После аппроксимации точек, достоверно входящих в три выделенных зоны, было получено уравнение ломаной плоскости, по которой построен график, показывающий характер комплексной зависимости осевого натяга от сочетания двух параметров резьбы (рис. 7). На графике можно выделить центральную зону, где изменение шага резьбы имеет незначительное влияние на величину осевого натяга. Этот эффект можно объяснить тем, что при таких сочетаниях параметров контакт между деталями происходит в зоне наружного витка, однако при увеличении отклонения шага по второй стороне профиля замыкание произойдет в районе нижнего витка резьбы (местные погрешности шага в модели не учитываются). Положение этих зон может изменяться при изменении других параметров ниппеля, и тем более – при учете отклонений резьбы муфты.

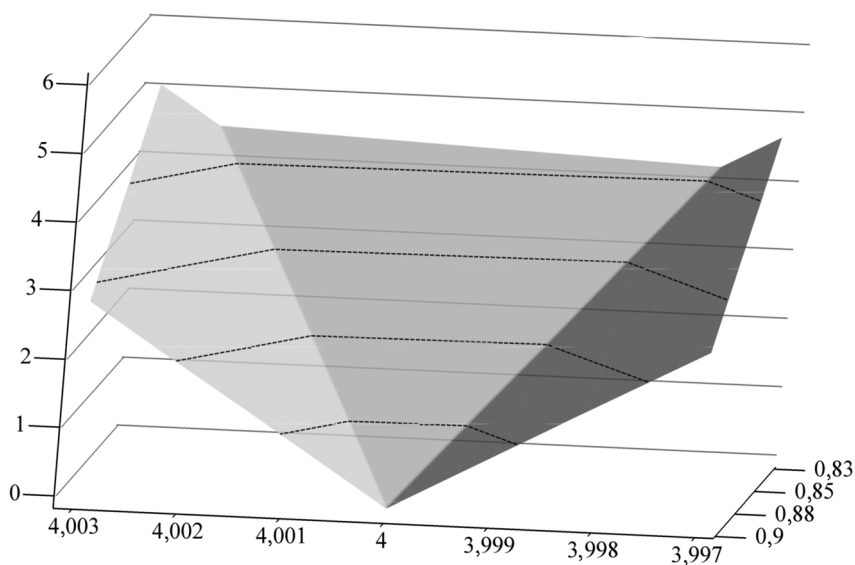


Рис. 7. Аппроксимированная зависимость величины осевого натяга от шага и угла конусности

Таким образом, создание комплексной аналитической зависимости между осевым натягом и всеми перечисленными факторами видится проблематичным.

Анализируя вышеприведенные результаты, можно сделать вывод, что разработанная модель воспроизводит реальные процессы, протекающие при свинчивании деталей с конической резьбой без приложения момента свинчивания. Кроме того, следует отметить, что погрешности по шагу и углу профиля с разноименными знаками оказывают различное влияние на величину натяга, в то время как в существующих методиках для расчетов берутся мо-

дули этих величин. Также данное обстоятельство не учитывается при назначении допусков на эти параметры и измерении резьб калибрами.

Список литературы

1. Математическое описание профиля резьбы / А.И. Лурье [и др.] // Вестник ПГТУ «Механика и технология материалов и конструкций». – 2004. – № 8. – С. 82–87.

2. Математическое формирование профиля конической резьбы / А.И. Лурье [и др.] // Вестник ПГТУ «Механика и технология материалов и конструкций». – 2004. – № 8. – С. 88–92.

3. Лурье А.И., Халтурин О.А. Обобщение математического описания профиля конических резьб // Вестник ПГТУ «Механика и технология материалов и конструкций». – 2006. – № 9. – С. 50–59.

4. Мэнли Р. Анализ и обработка записей колебаний. – М.: Машиностроение, 1972. – 368 с.

Получено 26.04.2010