

# Научные основы моделирования процесса упрочнения впадины резьбы бурильных труб обкатыванием роликом

**М.В. Песин**

к.т.н., доцент<sup>1</sup>, первый заместитель директора по нефтепромысловому оборудованию<sup>2</sup>

[M.Pesin@mail.ru](mailto:M.Pesin@mail.ru)

<sup>1</sup>ПНИПУ, Пермь, Россия

<sup>2</sup>ЗАО «Торговый дом ПКНМ», Пермь, Россия

**Выполнено компьютерное моделирование процесса упрочнения впадины резьбы обкатыванием роликом. Приведена концептуальная и математическая постановка задачи. В результате серии вычислительных экспериментов с использованием пакета ABAQUS получены оценки распределений остаточных напряжений в зависимости от степени вдавливания ролика.**

## Материалы и методы

Использованы методы математического моделирования.

## Ключевые слова

упрочнение резьбы обкатыванием, остаточные напряжения, метод конечных элементов

Одним из методов поверхностного упрочнения впадин конической замковой резьбы бурильных труб является обкатывание этих впадины роликом. В этом процессе приповерхностные слои материала впадины резьбы трубы испытывают пластические деформации, а возникающие при этом остаточные напряжения и поверхностное упрочнение материала (наклеп) повышают усталостную прочность труб, увеличивая срок их эксплуатации. Экспериментальное изучение остаточных напряжений вблизи впадины резьбы затруднено в силу сложного профиля поверхности резьбы и сильной неоднородности остаточных напряжений в малом по толщине слое материала резьбы. Поэтому целью данной работы являлась оценка с помощью методов математического моделирования распределений остаточных напряжений, возникающих после обкатывания. На рис. 1 приведена резьбовая часть ниппеля бурильной трубы, а также профиль и параметры резьбы. Геометрия ролика для обкатывания (рис. 2).

Ролик устанавливается во впадине резьбы без наклона к оси обрабатываемой детали и прижимается усилием  $P$ . Затем труба начинает вращаться, заставляя прижатый ролик катиться по впадине резьбы.

С точки зрения механики деформируемого твердого тела задача моделирования процесса обкатывания резьбы относится к трехмерным нестационарным контактным задачам упругопластического деформирования. Сложная геометрия моделируемых тел исключает возможность использования аналитических методов для решения подобной задачи. Далее представлена система гипотез для построения математической модели.

В качестве объекта моделирования выбираем область материала ниппеля трубы с резьбой. Введем некоторые упрощения.

Так как нагрузки при обкатывании вызывают только локальные пластические деформации во впадине резьбы под роликом, то в качестве моделируемого объема можно рассмотреть впадину с двумя витками резьбы. При этом будем рассматривать резьбу не на конической, а на цилиндрической поверхности. Учитывая достаточно большой (по сравнению с глубиной впадины резьбы) диаметр трубы, локальность деформирования и оценочный характер расчетов можно моделируемый объем развернуть с цилиндрической поверхности на плоскость. Все эти упрощения позволяют представить моделируемый объем в виде фрагмента одного витка длиной  $2\pi \cdot 10^{-3}$  м, так как показано на рис. 3. В начальном положении ролик располагается над канавкой резьбы в  $5 \cdot 10^{-3}$  м от левого торца витка (рис. 3б). Ролик считаем абсолютно твердым телом. Деформации материала резьбы считаем малыми, а физико-механические свойства материала — изотропными. В начальном состоянии материал резьбы принимаем находящимся в естественном состоянии (ненапряженным и ненагруженным). Процесс нагружения принимаем изотермическим. Влияние массовых сил пренебрегаем. Принимаем гипотезу об аддитивности скоростей упругих и пластических деформаций. Задача рассматривается как контактная, причем контактные условия постоянно уточняются в процессе решения. Нагружение выполняется в 2 шага. На первом шаге ролик вдавливается во впадину резьбы на величину  $U^*$ . На втором шаге весь фрагмент резьбы смещается влево (рис. 3б) на  $10 \cdot 10^{-3}$  м. При этом вдавленный ролик катится по впадине, вращаясь относительно своей неподвижной оси.

Перейдем к математической постановке данной задачи. Согласно сформулиро-

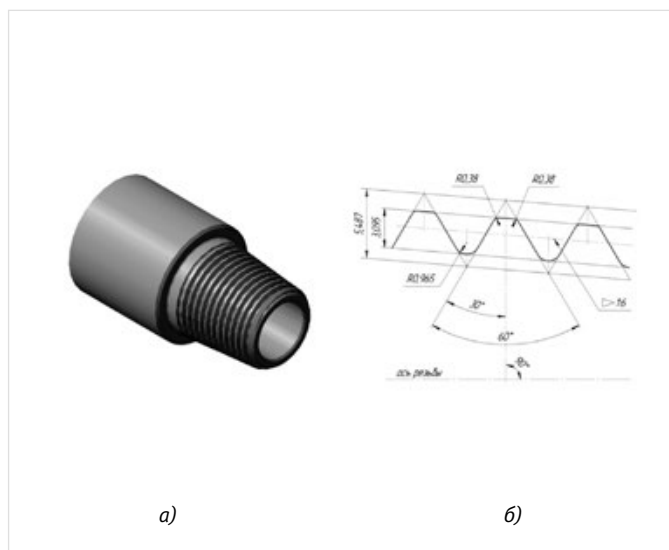


Рис. 1 — Нипель резьбовой части бурильной трубы (а), профиль и размеры резьбы (б)

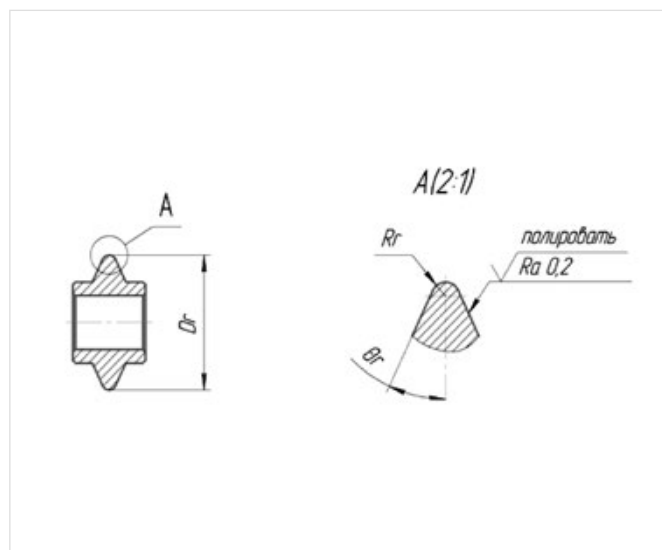


Рис. 2 — Геометрия ролика

ваным выше гипотезам на всех этапах рассматриваемого технологического процесса с точки зрения математического моделирования задачу можно представить как трехмерную термовязкоупругопластическую нестационарную квазистатическую контактную задачу. Её общая постановка приведена в [1, 2].

Пусть в некоторый момент времени  $t \in (0, \infty)$  деформируемое тело занимает область  $r \in \Omega^t, \Omega^t \in R^3$  (трехмерное пространство) с границей  $S^t = S_v(t) \cup S_{free}(t) \cup S_{кон}(t), S_v(t)$  — часть границы, подвергающаяся кинематическому воздействию,  $S_{free}(t)$  — свободная граница,  $S_{кон}(t)$  — граница контакта (смешанные граничные условия),  $\Omega^t = \Omega^t \cup S^t$ .

Необходимо определить поля скоростей перемещений  $v$ , напряжений  $\sigma$  и деформаций  $\epsilon$  для любого  $t \in (0, \infty)$ , удовлетворяющие следующей системе уравнений: уравнениям равновесия в скоростях

$$\hat{\nabla} \cdot \hat{\sigma} + \hat{\nabla} \cdot (v \cdot \hat{\nabla} \sigma) = 0, \quad r \in \Omega^t, \quad (1)$$

определяющим

соотношениям (ОС)

$$\sigma^t = \lambda I_1 (D - D^p) g + 2\mu (D - D^p),$$

$$D^p = \begin{cases} \frac{3S \cdot D}{2 \sigma_s^2} S, & \sigma_s \geq \sigma_s, \text{ и } \sigma \cdot \sigma^t \geq 0, \\ 0 & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad r \in \bar{\Omega}^t, \quad (2)$$

кинематическим соотношениям

$$D = \frac{1}{2} (\hat{C} v + v \hat{C}), \quad r \in \bar{\Omega}^t \quad (3)$$

статическим и кинематическими граничным условиям

$$v_x = 0, \sigma_{xy} = \sigma_{xz} = 0 \quad r \in S_{y1}^t; \quad (4a)$$

$$v_y = 0, \sigma_{xy} = \sigma_{yz} = 0 \quad r \in S_{y2}^t; \quad (4б)$$

$$\sigma_x = \sigma_y = \sigma_z = 0 \quad r \in S_{free}^t; \quad (4в)$$

$$v_z = 0, \sigma_{xz} = \sigma_{yz} = 0 \quad r \in S_{y3}^{своб1}; \quad (4г)$$

$$v_z = -0,1 \text{ м/сек}, \sigma_{xz} = \sigma_{yz} = 0 \quad r \in S_{y3}^{своб2}; \quad (4д)$$

условия для оси ролика

$$v_x = v_z = 0, v_y = -0,1 \text{ м/сек, для шага 1,}$$

$$v_x = v_y = v_z = 0, \text{ для шага 2 при начальных условиях } \sigma(r) = \epsilon(r) = 0, v(r) = 0, r \in \bar{\Omega}^0; \quad (5)$$

Для первого этапа техпроцесса соотношения (5.10)–(5.13) выполняются автоматически согласно принятым гипотезам, для последующих — исходя из непрерывности процесса (начальный момент нового этапа соответствует концу предыдущего).

Перемещения  $u$  и напряжения  $\sigma$  определяются интегрированием:

$$u(r, t) = u_0(r) + \int_0^t v(r, \tau) d\tau \quad (6)$$

$$\sigma(r, t) = \sigma_0(r) + \int_0^t \hat{\sigma}(r, \tau) d\tau \quad (7)$$

По полю перемещений (6) можно построить произвольную меру деформации.

В уравнениях (1)–(7):  $\hat{C}$  — набла-оператор (векторный дифференциальный оператор Гамильтона в текущем лагранжевом базисе), верхний индекс R означает

кортационную производную,  $D, D^p$  — тензоры полной и пластической деформации скорости,  $n$  — вектор единичной нормали к границе,  $\sigma_s$  — упрочнение материала,  $\sigma_n$  — интенсивность напряжений.

Соотношениям (1–7) должны удовлетворять поля  $(v, \sigma, \epsilon)$  при моделировании на каждом этапе рассматриваемого технологического процесса. Отличия касаются начального состояния материала на каждом этапе, начальной для этапа конфигурации области и задаваемых граничных условий. Отметим, что определяющие соотношения (2) задают поведение материала резбы согласно макрофеноменологической теории пластического течения.

Данная задача является существенно нелинейной, в частности — вследствие наличия контактных граничных условий. Рассмотрим более подробно контактные граничные условия.

Следует отметить, что контактная граница  $S_{кон}(t)$  априори неизвестна. Для её определения используется следующий подход.

Обозначая через  $S_{возм.кон.рез}(t_1)$  и  $S_{возм.кон.рол}(t_1)$  поверхность исследуемой области резбы и ролика, где контакт между этими телами возможен, а через  $S_c(t_1)$  — контактную поверхность резбы для момента времени  $t_1$ . Область контакта можно определить как область пересечения поверхностей  $S_{возм.кон.рол}(t_1)$  и  $S_{возм.кон.рез}(t_1)$  следующим образом:

$$S_c(t_1) = \{r \in S_{возм.кон.рол}(t_1) \cap S_{возм.кон.рез}(t_1) \wedge S_{возм.кон.рол}(t_1)\} \quad (8)$$

Заметим, что  $S_c(t_1)$  представляет собой область «геометрического контакта», в которой возможны подобласти отсутствия «физического контакта» (т.е. отсутствия взаимодействия геометрически касающихся поверхностей друг с другом). В дальнейшем будем устанавливать граничные условия для некоторого фиксированного момента времени, поэтому индекс  $t_1$  будем опускать. Выделим в области  $S_c$  две зоны:

$$S_c^0 = \{r \in S_c | (\sigma_n(r, t) = 0)\} \text{ — зона «отлипания»} \quad (9.1)$$

$$S_c^* = \{r \in S_c | (\sigma_n(r, t) < 0)\} \text{ — зона контакта} \quad (9.2)$$

где  $\sigma_n = n \sigma n$  — нормальное напряжение. При скоростной постановке задачи подразделяется еще на две подобласти, в которых скорость нормальных напряжений либо  $\sigma_n < 0$ , либо  $\sigma_n = 0$ , первая из которых в дальнейшем относится к  $S_c^0$ , а на второй задаются граничные условия свободной поверхности.

Зона  $S_c$  также подразделяется на две части: зону прилипания  $S_{ca}$  и зону проскальзывания  $S_{cs}$ . Не уменьшая общности, будем считать справедливым закон трения Зибеля-Кулона. Тогда

$$S_{ca} = \{r \in S_c | |\sigma_\tau| < f |\sigma_n|\}$$

$$S_{cs} = S_c \setminus S_{ca} \quad (10)$$

где  $f$  — коэффициент трения, принимаемый в данном случае 0,2,

$$\sigma_\tau = -\tau_f \frac{v_{cx}}{v_{cy}}$$

— касательная составляющая (к поверхности ролика) вектора напряжения,

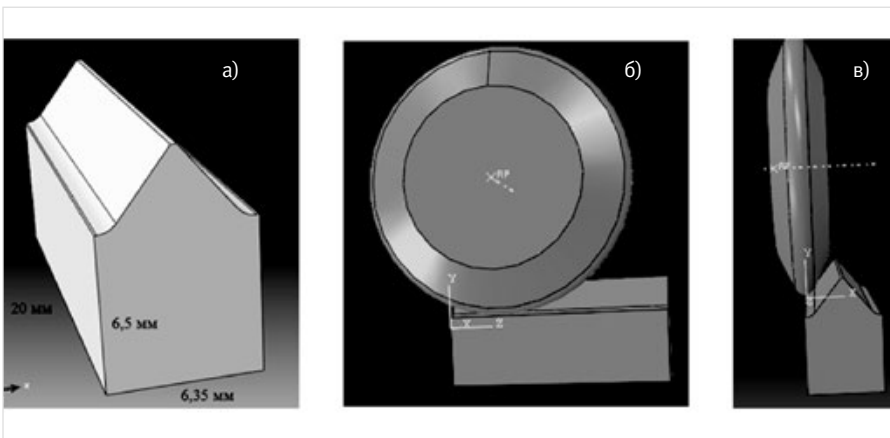


Рис. 3 — Модель обкатки: (а — часть витка; б — вид с боку; в — вид с вершины оси z)

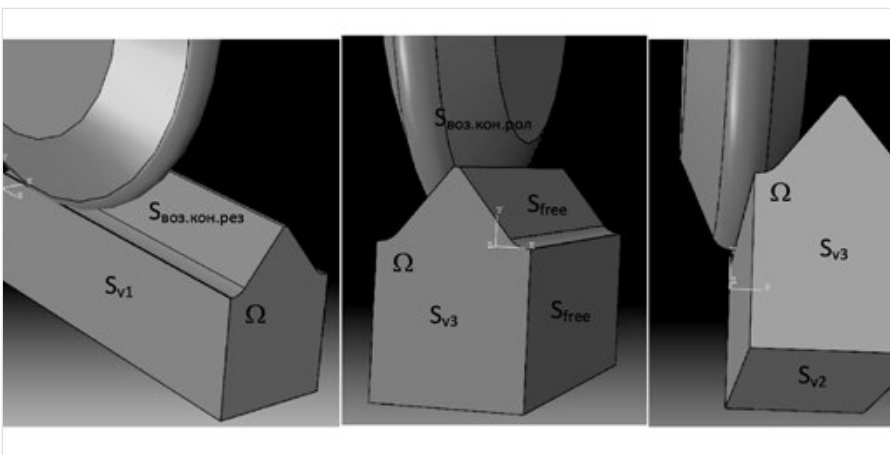


Рис. 4 — Исследуемая область

$$\tau_f = \begin{cases} f|\sigma_n|, & \text{при } f|\sigma_n| < \tau_T \\ \tau_T, & \text{при } f|\sigma_n| \geq \tau_T \end{cases}$$

— величина модуля вектора действующего касательного напряжения,

$$\tau_T = \sigma_s / \sqrt{3} \quad \text{— предел текучести материала на сдвиг.}$$

Для получения приближенного решения поставленной задачи (1)–(10) был использован программный комплекс ABAQUS, использующий традиционный для механики деформируемого твердого тела метод конечных элементов [3, 4]. В частности, в силу существенной нелинейности задачи был

использован модуль Abaqus/Explicit. Для описания исследуемой области конечными элементами была построена конечно-элементная сетка (рис. 5), состоящая из 44232 элементов C3D8R и 39593 узлов.

Для исследования распределения остаточных напряжений после обкатки резьбы роликом были проведены вычислительные эксперименты при различных величинах вдавливания ролика  $U^*$ . Результаты исследований были внедрены в производство [5].

#### Итого

С точки зрения механики деформируемого твердого тела сделана постановка трехмерной нестационарной контактной задачи упругопластического деформирования.

#### Выводы

Подводя итог можно заключить, что в процессе обкатывания резьбы роликом в приповерхностных слоях материала межвитковой впадины резьбы формируются области сжимающих напряжений. Данное обстоятельство, без сомнения, приводит к упрочнению приповерхностного слоя и препятствует возникновению микротрещин. С другой стороны, в результате данного процесса в подповерхностных слоях материала резьбы могут формироваться области значительных растягивающих напряжений, что может приводить к возникновению внутренних микро- и макротрещин, приводящих к разрушению конструкции. Подбирая оптимальные параметры процесса (геометрия ролика и сила его прижатия), можно получать благоприятные для данной конструкции распределения остаточных напряжений.

#### Список используемой литературы

1. Поздеев А.А., Няшин Ю.И., Трусов П.В. Остаточные напряжения: Теория и приложения. М.: Наука, 1982. 112 с.
2. Поздеев А.А., Трусов П.В., Няшин Ю.И. Большие упругопластические деформации: теория, алгоритмы, приложения. М.: Наука, 1986. 232 с.
3. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике. М.: Мир, 1975. 542 с.
4. Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов. М.: Мир, 1979. 392 с.
5. Песин М.В. Повышения надежности буровых труб на стадии проектирования путем использования математического моделирования процесса упрочнения резьбовой поверхности // Экспозиция Нефть Газ. 2013. №2 (27). С. 56–57.

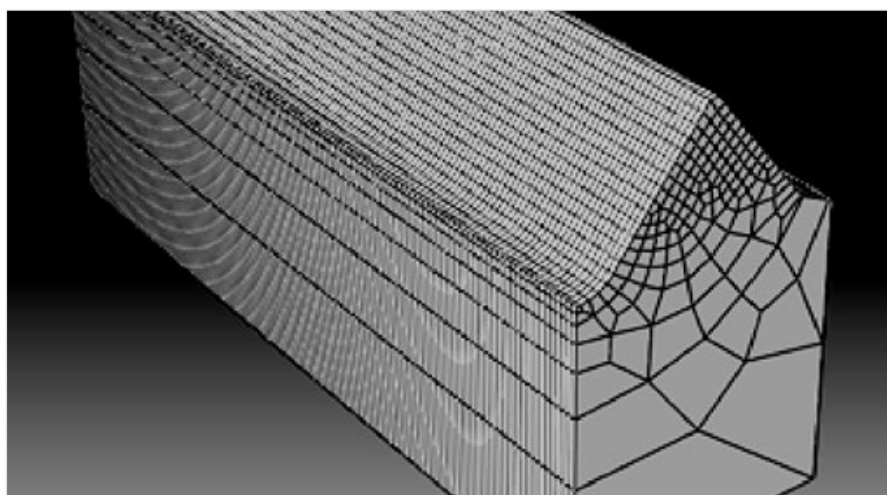


Рис. 5 — Конечно-элементная сетка

ENGLISH

OIL PRODUCTION

## Scientific the bases of the simulation of the process of strengthening the bottom of thread of drill pipes by deep roll

UDC 621.77.07

#### Authors:

**Mikhail V. Pesin** — dr. sci. tech., senior lecturer<sup>1</sup>; deputy director<sup>2</sup>; M.Pesin@mail.ru

<sup>1</sup>State National Research Polytechnical University of Perm, Perm, Russian Federation

<sup>2</sup>CJSC Trading house PKNM (Perm Oil Engineering Company), Perm, Russian Federation

#### Abstract

Performed computer simulations of the hardening of the hollow carving deep roll. Provides conceptual and mathematical formulation of the problem. As a result of a series of numerical experiments using ABAQUS package evaluation of residual stresses distributions are obtained depending on the degree mounting of the roll.

#### Materials and methods

Methods of mathematical modelling are used.

#### Results

From the point of view of the mechanics solid of body being deformed is made setting the three-dimensional nonstationary contact problem of elastic-plastic deformation.

#### Conclusions

It is possible to conclude that in the process of deep roll thread by roller in the near-surface layers of the material of interturn bottom of thread the regions of the compressive stresses are formed. This circumstance undoubtedly leads to strengthening of near-surface layer and it prevents the appearance of microscopic

cracks. From other side, as a result this process in the sub-surface layers of the material of thread can be formed the regions of significant tensile stresses, which can lead to the appearance of the internal micro- and of the macrofissures, which lead to the structural failure. Selecting the optimum parameters of process (geometry of roller and the force of its pressing), it is possible to obtain the favorable for the given construction distributions of residual stresses.

#### Keywords

hardening of deep roll thread, residual stresses, finite element method

#### References

1. Pozdeev A.A., Nyashin Yu.I., Trusov P.V. *Ostatochnye napryazheniya: Teoriya i prilozheniya* [Residual stresses: Theory and application]. Moscow: Nauka, 1982. 112 p.
2. Pozdeev A.A., Trusov P.V., Nyashin Yu.I. *Bol'shie uprugoplasticheskie deformatsii: teoriya, algoritmy, prilozheniya* [Large elastic-plastic deformations: theory,

algorithms, application]. Moscow: Nauka, 1986, 232 p.

3. Zenkevich O. *Metod konechnykh elementov v tekhnike* [Method of final elements in the technology]. Moscow: Mir, 1975, 542 p.
4. Segerlind I. *Primenenie metoda konechnykh elementov* [Application of a method of final elements]. Moscow: Mir, 1979, 392 p.
5. Pesin M.V. *Povysheniya nadezhnosti*

*buril'nykh trub na stadii proektirovaniya putem ispol'zovaniya matematicheskogo modelirovaniya protsessa uprochneniya rez'bovoy poverkhnosti* [Improving reliability of drill pipe at the design stage through the use of mathematical modelling of the process of hardening the threaded surface] *Exposition Oil Gas*, 2013, issue 2, pp. 56–57.