

# Моделювання тертя у викривлених нафтовидобувних свердловинах

О.В. Євчук

кафедра інформаційно-телекомунікаційних технологій  
та систем  
Івано-Франківський національний технічний  
університет нафти і газу  
Івано-Франківськ, Україна  
olga.yevchuk@gmail.com

В.А. Ровінський

кафедра інформатики  
Прикарпатський національний університет  
імені Василя Стефаника  
Івано-Франківськ, Україна  
musicneutrino@gmail.com

## Friction modeling in deviated oil wells

O.V. Yevchuk

Department of Information and Telecommunication  
Technologies and Systems  
Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and  
Gas  
Ivano-Frankivsk, Ukraine  
olga.yevchuk@gmail.com

V.A. Rovinski

Department of Computer Science  
Vasyl Stefanyk Precarpathian  
National University  
Ivano-Frankivsk, Ukraine  
musicneutrino@gmail.com

**Анотація** — Обґрунтовано необхідність врахування сухого та граничного тертя при моделюванні руху штангової колони у викривлених свердловинах. Запропоновано використовувати параметричну кубічну сплайн-інтерполяцію для оцінки просторової конфігурації штангової колони, що дозволить підвищити точність моделювання притискних сил між штанговою колоною та колоною НКТ.

**Abstract** — Taking into account dry and lubricated friction in modelling of rod string movement in deviated wells is demonstrated. Proposed parametric cubic spline interpolation for estimation of spatial configuration of rod string allows increasing of contact force modelling between rod string and tubing.

**Ключові слова**—викривлені свердловини, штангова глибинно-насосна установка, тертя, інтерполяція

**Keywords**—deviated wells, sucker-rod pumping unit, friction, interpolation

### I. ВСТУП

Основними особливостями експлуатації штангових глибинно-насосних установок (ШГНУ) у викривлених свердловинах є підвищене тертя та наявність додаткових напружень згину на ділянках із значною кривиною стовбура свердловини, що призводить до пришвидшеного зносу штанг та з'єднувальних муфт, а зачасти і до обривів штангової колони. Врахування цих факторів дозволяє

більш точно інтерпретувати дані динамометрії (вимірювання зусилля на полірованому штоку штангової колони), яка залишається основним методом отримання діагностичної інформації в задачах діагностики технічного стану штангової колони та ШГНУ в цілому.

Найчастіше тертя моделюється за допомогою коефіцієнта в'язкого тертя, що використовується у класичному рівнянні руху штангової колони [1]. Існує ряд досліджень, присвячених визначенню коефіцієнта тертя, де розглядається як виключно в'язке тертя [2], так і граничне (із змашуванням) та сухе тертя [3], де аналізується вплив на його величину різних факторів, зокрема і викривленості або куту нахилу стовбура свердловини та притискної сили між штанговою колоною та колоною насосно-компресорних труб. Подібна задача виникає також при моделюванні взаємодії бурильної та обсадної колони в процесі буріння свердловини [4], та для нафтовидобувних установок інших типів, зокрема гвинтових [5]. В рамках подібної моделі здійснюється розрахунок притискних сил по довжині стовбура свердловини, наприклад за допомогою числового моделювання методом кінцевих елементів [6].

### II. ВИДИ ТЕРТЯ У ПІДЗЕМНІЙ ЧАСТИНІ ШГНУ

При русі штангової колони всередині колони насосно-компресорних труб (НКТ) штангової глибинно-насосної установки на штангову колоною діють сили опору,

зумовлені наступними видами тертя (рис. 1): в'язке тертя між штанговою колоною та рідиною, що видобувається; тертя між штанговою колоною та колоною НКТ у зонах контакту між ними на викривлених ділянках стовбура свердловини; тертя у парі плунжер-циліндр глибинного насоса; тертя між сальником та полірованим штоком штангової колони. В останніх трьох випадках переважно діє граничне тертя, тобто тертя між двома твердими поверхнями у присутності змащувальної рідини в зазорі між ними. Сухого тертя зазвичай слід уникати, оскільки воно призводить до швидкого зносу поверхонь тертя. Тим не менше, на ділянках із значною викривленістю притискна сила між штанговою колоною та колоною НКТ досягає величин, які зумовлюють повне витіснення змащуючого шару рідини із зони контакту, що призводить до наявності сухого тертя і, як наслідок, швидкого зносу тіла штанг і з'єднувальних муфт.

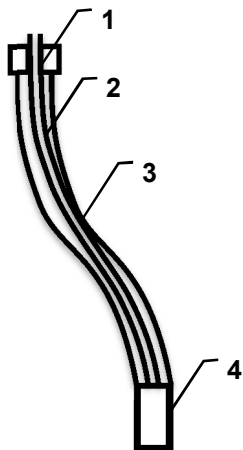


Рис. 1. Тертя у підземній частині ШГНУ: 1- у парі сальник-полірований шток; 2 – гідродинамічне; 3 – між штанговою колоною та колоною НКТ; 4 – у парі плунжер-циліндр

У вертикальних свердловинах та свердловинах з незначним кутом нахилу цілком допустимо враховувати в моделі руху штангової колони лише в'язке тертя, оскільки сухе та граничне тертя в цьому випадку обмежується лише парами полірований шток-сальник та плунжер-циліндр глибинного насоса і є незначними порівняно із в'язким тертям. Для суттєво викривлених свердловин систематична похибка, зумовлена фактичним моделюванням інших видів тертя як в'язкого, стає суттєвою, що призводить до спотворення форми плунжерної динамограми, що розраховується із наземної на основі моделі руху штангової колони.

В зв'язку з вищенаведеним виникає задача вдосконалення моделювання сил тертя при русі штангової колони у викривлених свердловинах, зокрема на основі інформації про геометричну конфігурацію стовбура свердловини за даними інклінометрії.

### III. ІНТЕРПОЛЯЦІЯ ПРОСТОРОВОЇ КОНФІГУРАЦІЇ ШТАНГОВОЇ КОЛОНИ

Вихідною інформацією для розрахунку сил тертя між штанговою колоною та колоною НКТ є результати інклінометричних досліджень – дані про кут нахилу та

азимут у скінченній множині опорних точок по довжині стовбура свердловини. На даний час для визначення положення опорних точок та інтерполяції проміжних точок найчастіше використовується метод мінімальної кривини [7], що передбачає моделювання ділянок стовбура свердловини сегментами кола таким чином, щоб в опорних точках співпадали градієнти відповідних кривих. Таким чином отримується деяка крива  $f(x,y,z) \in C^1$ , тобто не гарантується неперервність кривини в опорних точках.

Пропонується використати параметричну кубічну сплайн-інтерполяцію:

$$x(t) = \overline{C}_x \cdot \overline{t}, y(t) = \overline{C}_y \cdot \overline{t}, z(t) = \overline{C}_z \cdot \overline{t},$$

$$\overline{t} = [1 \quad t \quad t^2 \quad t^3]$$

де  $t$  – параметр, що приймається рівним довжині кривої від гирла свердловини ( $t=0$ ) до точки з координатами  $[x(t), y(t), z(t)]$ ;  $\overline{C}_x, \overline{C}_y, \overline{C}_z$  – вектори сплайн-коефіцієнтів, що обчислюються окремо і незалежно по кожній координаті. Оскільки дані інклінометрії, як правило, отримують через рівні проміжки саме по відстані від гирла свердловини, це дозволить спростити розрахунок сплайн-коефіцієнтів.

### ВИСНОВКИ

В результаті аналізу особливостей тертя у викривлених свердловинах встановлено, що необхідно окремо враховувати сухе та граничне тертя в математичній моделі руху колони штанг. Запропоновано використання параметричної кубічної сплайн-інтерполяції для оцінки просторової конфігурації штангової колони ШГНУ. Підвищення точності інтерполяції форми штангової колони дозволить покращити точність розрахунку притискної сили в зонах контакту, що є одним із етапів визначення сил тертя, які діють на штангову колоною.

### ЛІТЕРАТУРА REFERENCES

- [1] Gabor Takacs, "Sucker-Rod Pumping Handbook: Production Engineering Fundamentals and Long-Stroke Rod Pumping", Elsevier, 2015. – 598pp.
- [2] Z. Ma, S. L. Peng, Z. Z. Qu, J. Li, "The Detailed Calculation Model of the Friction between Sucker Rod and the Liquid in the Sucker Rod Pump Lifting System of Heavy Oil", Applied Mechanics and Materials, Vol. 694, pp. 346-349, 2014
- [3] Насосная добыча высоковязкой нефти из наклонных и обводненных скважин / К. Р., Богомольный, Е.И. Уразаков. - М. : Недра-Бизнесцентр, 2003. – 303с.
- [4] Салихов И.Ф. Расчет прижимающего усилия в скважине и экспериментальное обоснование его влияния на силу трения между горной породой и бурильными трубами в среде различных промысловых жидкостей // Нефтегазовое дело: электрон. науч. журн. - 2016. - № 1. С.39-51
- [5] Уразаков К. Р., Латыпов Б. М., Исмагилов Р. Р. Экспериментальные исследования коэффициента трения элементов штанговой колонны винтовых насосных установок// Нефтегазовое дело: электрон. науч. журн. 2015. №3. С.256–270
- [6] Minzheng Jiang, Yumiao Cai, Yu Lu and Dong Wang, 2013. Research on Wear Law of Rod String in Directional Well. Journal of Applied Sciences, 13: 4676-4680.
- [7] Ted G. Byrom, "Casing and Liners for Drilling and Completion", Elsevier, 2015. – 420pp.