

## Анализ причин самопроизвольного отворота элементов раздвижного фрезерного и расширяющего инструмента

А.А. Дронов,  
А.А. Саломатин  
(ООО НПП «БУРИНТЕХ»)

Адрес для связи: bit@burinteh.com

**Ключевые слова:** самопроизвольный отворот, момент инерции, раздвижной фрезер, фрезерование, длина стружки.

Перед буровыми компаниями в настоящее время особо остро стоят задачи, связанные с улучшением технико-экономических показателей бурения и эксплуатации скважин. С каждым годом фонд эксплуатируемых скважин устаревает, и, как следствие, снижается добыча углеводородов. Задача улучшения технико-экономических характеристик эксплуатируемых скважин решается с помощью использования технологии строительства боковых стволов. Перед резкой бокового ствола проводится вырезание части обсадной колонны раздвижными фрезерами. Решение указанной задачи для разрабатываемых месторождений – это снижение себестоимости 1 м проходки при строительстве скважины, а также предупреждение различных аварийных ситуаций, связанных с обвалом стенок скважины и неправильной формой сечения ее ствола. Для решения проблем такого рода используются раздвижные расширители. Кроме того, расширитель и фрезер применяются для проведения ремонтно-изоляционных работ (РИР).

Инструмент для расширения ранее пробуренного интервала скважины, а также оборудование для фрезерования интервала обсадной колонны и цементного камня эксплуатируются в сложных условиях: высокие температуры, неопределенность условий работы, скачки нагрузки и крутящего момента. Факторами, ухудшающими условия работы, являются также [1]:

- значительные вибрационные нагрузки, возникающие из-за невозможности обеспечения точной центровки расширителя или фрезера в стволе скважины либо обсадной колонне;
- наличие подвижных элементов, таких как механизм выдвижения рабочих лопастей, раздвижные рабочие лопасти и др.; это связано с обеспечением прохода в стволе

### Expanding milling and reaming tools elements spontaneous twist-off cause analysis

A.A. Dronov, A.A. Salomatina (BURINTEKH Ltd., RF, Ufa)

E-mail: bit@burinteh.com

**Key words:** spontaneous twist-off, moment of inertia, sliding router, routing, length of the chip.

In the article the process of spontaneous flap elements tool for expanding the borehole and milling casing is considered on the example of the sliding router. The influence of such factors as the moment of inertia arising is evaluated during milling. Based on analysis of the milling process of the casing and a comparison with milling on the milling machine we identified factors that have the greatest impact on the tool wedges. The formula describing the dependence of the moment of inertia of the length of milled chips allows us to observe the time dependence of the probability and the length of the flap milled chips, from which we can get the minimum permissible value of the chip, where the flap is possible. Based on the collected statistics in real time we can monitor the moment of inertia.

диаметром, меньшим конечного диаметра расширения или фрезерования;

- возможность установки нижнего центризатора в зумпф и, как следствие, его прихват.

На основании анализа возможных осложнений, а также промышленной статистики можно сделать вывод, что до настоящего времени не рассматривалась проблема самопроизвольного отворота элементов инструмента. Исходя из этого, в статье исследуется процесс самопроизвольного отворота элементов инструмента для расширения ствола скважины и фрезерования обсадной колонны на примере работы раздвижного фрезера. Оценивается влияние на самопроизвольный отворот момента инерции, возникающего при фрезеровании.

Рассмотрим детально процесс фрезерования обсадной колонны раздвижным фрезером. Применяемые раздвижные фрезеры имеют различные конструкции, однако основные принципы их работы схожи. На рис. 1 приведена принципиальная схема активации, которая подходит для большинства современных раздвижных фрезеров. Инструмент работает следующим образом. Устройство со сложенными в транспортное положение лопастями 3, спускается на буровых трубах к заданной глубине начала фрезерования, затем происходит активация фрезера, как правило, гидромеханическая. Активация подразумевает наличие механического активатора (толкателя) 1, который под действием перепада давления промывочной жидкости, создаваемого в корпусе фрезера 2, меняет свое положение и начинает передавать усилие на рабочие лопасти. Лопасти 3 под действием усилия толкателя 1 выдвигаются из корпуса до контакта с обсадной колонной, и далее начинается процесс врезки в обсадную колонну, что фиксируется на устье скачком момента. Процесс врезки в обсадную ко-

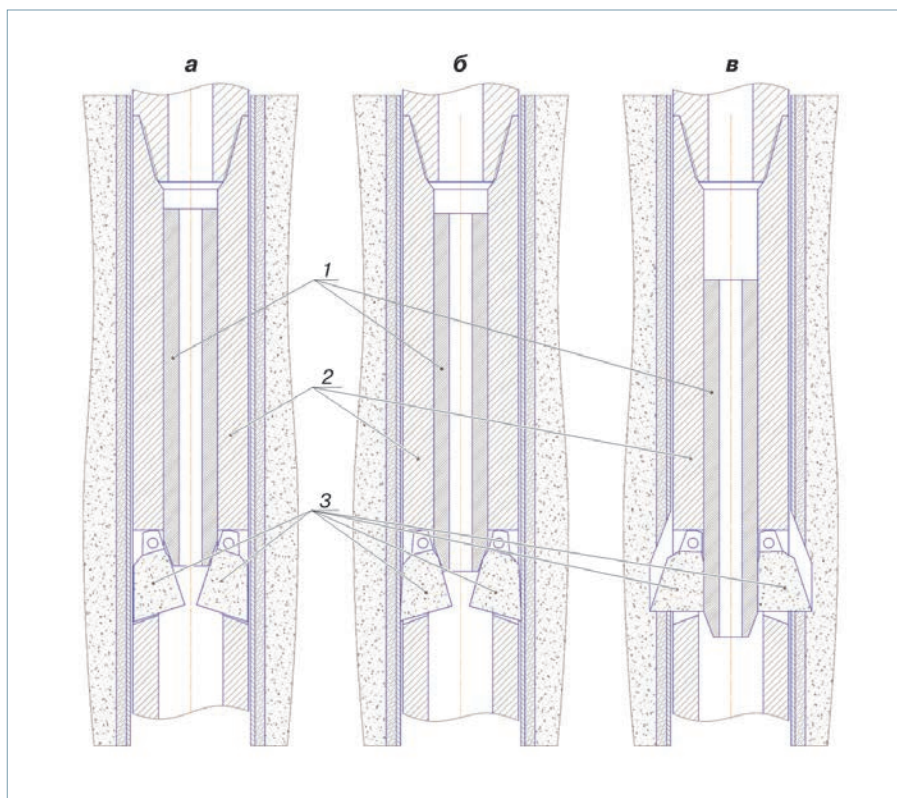


Рис. 1. Принципиальная схема активации раздвижного фрезера: а – транспортное положение; б – врезка в обсадную колонну; в – рабочее положение; 1 – толкатель; 2 – корпус фрезера; 3 – лопасти

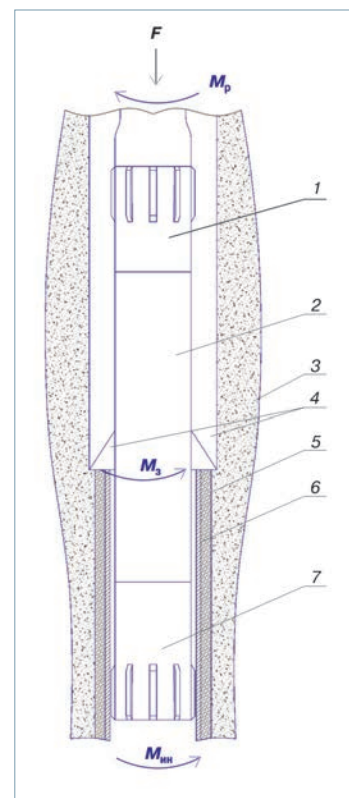


Рис. 2. Принципиальная схема работы раздвижного фрезера: 1, 7 – соответственно верхний и нижний центратор; 2 – корпус фрезера; 3 – горная порода; 4 – рабочие лопасти; 5 – цементный камень; 6 – обсадная колонна

лонну в зависимости от ее диаметра, толщины стенки и конструкции фрезера варьирует от 30 мин до 3 ч. Окончание врезки и полное выдвижение лопастей фиксируются на устье снижением момента, после чего создается осевая нагрузка на фрезер и начинается процесс фрезерования обсадной колонны.

Для выявления причин самопроизвольного отворота оборудования, установленного ниже рабочих лопастей, рассмотрим работу раздвижного фрезера с точки зрения сил, действующих на него в процессе фрезерования (рис. 2). В нормальных условиях фрезер работает с частотой вращения  $70\text{--}90\text{ мин}^{-1}$  [1], на него воздействуют усилием  $F$  и обеспечивают разрушающий момент  $M_p$ , необходимый для разрушения обсадной колонны и цементного камня. Однако частота вращения фрезера непостоянна: в процессе работы происходят заклинивания инструмента и, как следствие, его резкие, кратковременные остановки. Усилие, приводящее к кратковременным остановкам, возникает в точке контакта режущих лопастей и обсадной колонны. Оно передается через лопасти 4 на корпус 2 и далее через бурильные трубы на стол ротора. Момент заклинивания  $M_3$  направлен противоположно разрушающему моменту  $M_p$  (см. рис. 2), следовательно, его возникновение не влияет на отворот резьбы выше корпуса фрезера. Однако для обеспечения центрации фрезера в обсадной колонне и предотвращения преждевременного выхода из строя его элементов из-за повышенных вибраций необходима установка дополнительного оборудования ниже корпуса фрезера. Это может быть как небольшой центратор 7, так и центратор

с удлиняющим элементом. Момент заклинивания действует на центратор, вследствие чего возникает момент инерции  $M_{ин}$ , способствующий отвороту при каждом заклинивании инструмента.

Заклинивания фрезера могут происходить вследствие действия многих факторов: как из-за включений особо твердых горных пород, так и из-за неоднородности структуры цементного камня. Несмотря на это, главный фактор заключается в процессе фрезерования металла и зависит от структуры и качества материала колонны. Во время фрезерования лопасти забуриваются в горную породу на незначительную глубину, а цементный камень, как правило, тщательно подготавливается перед заливкой и редко содержит особо твердые включения. Фрезерование обсадной колонны имеет сходство с фрезерованием металлической заготовки на фрезерном станке. Проведя параллель между этими процессами, можно применить зависимости, выявленные при обработке металлов, а также проанализировать проблемы, возникающие при обработке заготовки.

В общем случае фрезерование в технологии обработки металлов представляет собой обработку заготовки вращающимся многокромочным инструментом. Этот процесс зависит от ширины и глубины фрезерования, скорости подачи, удельной силы резания, частоты вращения шпинделя.

Рассматривая процесс фрезерования обсадной колонны, можно сделать вывод, что основными являются следующие причины заклинивания во время работы колонного фрезера.

1. Большая подача при малой частоте вращения.

Подача при фрезеровании зависит от осевой нагрузки на инструмент. Она варьирует в широком интервале и зависит от многих факторов, таких как компоновка низа буровой колонны, интенсивность искривления ствола скважины, нагрузка на крюке буровой установки. Кроме того, далеко не во всех случаях фрезерования точно оттарированы датчики, на основании показаний которых проводится контроль момента, осевой нагрузки и частоты вращения фрезера.

2. Характеристики и качество фрезеруемой обсадной колонны.

Обсадные трубы изготавливаются из стали групп прочности от Д до Т [2]. В зависимости от группы прочности стали труб меняется удельная сила резания колонны. Кроме того, в основном фрезерование выполняется в длительно эксплуатируемых скважинах. Металл обсадной колонны под действием ряда факторов, таких как коррозия, деформация, механические повреждения, имеет несплошности, что проявляется при фрезеровании возникновением кратковременных скачков частоты вращения и момента. Процесс фрезерования контролируется на устье по показаниям датчиков, а также с помощью контроля выноса металлической стружки отфрезерованной колонны. На основании этих данных можно также сделать выводы о зависимости заклинивания от размера стружки фрезеруемой колонны. Как показала практика отработки колонных фрезеров, максимальная вероятность заклинивания возникает в момент обрыва нити стружки.

В среднем фрезерование продолжается от 15 до 40 ч в зависимости от свойств фрезеруемой колонны, качества цементного камня за колонной и интервала фрезерования. В течение этого времени происходят многократно повторяющиеся кратковременные подклинивания, при которых снижение частоты вращения в каждом случае различно. Частота вращения может изменяться от незначительной величины до полного заклинивания. Моментальные остановки при полном заклинивании происходят за короткий промежуток времени и периодически повторяются, следовательно, элементы, установленные ниже рабочих лопастей испытывают периодически повторяющийся момент инерции, стремящийся привести к отвороту резьбового соединения. Количественно этот процесс можно оценить по формуле [3]:

$$M_{\text{ин.ост}} = \frac{m \cdot D^2 \cdot d \cdot (n_0 - n)^2}{2921 \cdot S_0}, \quad (1)$$

где  $m$ ,  $D$  – соответственно масса и диаметр элементов, установленных ниже рабочих лопастей;  $d$  – диаметр фрезеруемой обсадной колонны;  $n_0$ ,  $n$  – соответственно начальная и конечная частота вращения фрезера;  $S_0$  – длина отфрезерованной стружки; 2921 – число, получаемое при перемножении числовых значений, фигурирующих в формулах, использованных для расчета момента инерции.

При расчете момента инерции длина стружки важна как расстояние, пройденное лопастью с момента врезки в металл до момента заклинивания, следовательно, необходимо учесть усадку стружки. Усадка – явление, при котором наблюдаются укорачивание стружки по длине и разбухание по ширине, оно характеризуется коэффициентом усадки  $K$  [4].

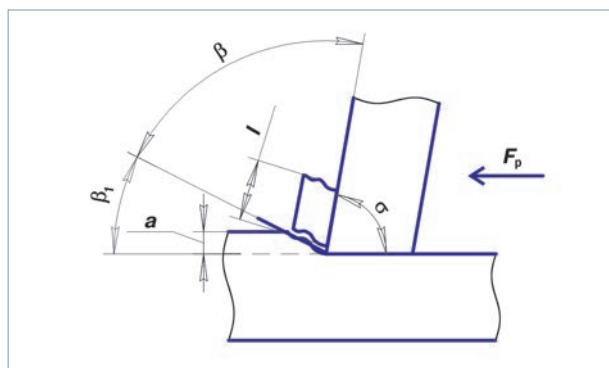


Рис. 3. Принципиальная схема процесса образования стружки:  $a$  – глубина резания;  $l$  – длина стружки;  $\alpha$  – угол резания;  $F_p$  – сила резания;  $\beta$  – угол действия;  $\beta_1$  – угол скалывания

Для расчета фактического расстояния, за которое произошло заклинивание необходимо вычислить коэффициент усадки для процесса фрезерования. Фрезерующие пластины на лопасти расположены под углом  $80-90^\circ$  в зависимости от конструкции. Угол  $\beta + \alpha$  является постоянным и равным  $150^\circ$  (рис. 3). С учетом это коэффициент  $K$  можно определить по соотношению

$$K = \frac{S}{S_0} = \frac{\sin \beta_1}{\sin \beta} = 0,53, \quad (2)$$

где  $S$  – длина стружки с учетом коэффициента усадки. Следовательно, начальная длина снятого слоя металла

$$S_0 = 0,53 \cdot S. \quad (3)$$

Формулу (1) при условии моментальной остановки можно упростить, так как известно, что в момент остановки  $n = 0$ .

Исходя из предположения, что основной причиной самопроизвольного отворота части фрезера, установленной ниже режущих лопастей, является момент инерции, и основываясь на вышеприведенных расчетах, можно сделать вывод, что вероятность самопроизвольного отворота возрастает с увеличением:

- массы и диаметра элементов, установленных ниже рабочих лопастей;
- начальной частоты вращения фрезера;
- нагрузки на фрезер.

Уменьшение длины отфрезерованной стружки увеличивает момент инерции.

Для оценки влияния каждого фактора и изучения возможных способов снижения вероятности самопроизвольного отворота остановимся на них подробнее.

#### Масса и размеры элементов, установленных ниже рабочих лопастей

Два фактора, непосредственно влияющие на момент инерции, а следовательно, и на вероятность самопроизвольного отворота входят в формулу (1), причем зависимость момента инерции прямо пропорциональна, т.е. крайне нежелательно, с точки зрения безаварийной работы фрезера, увеличивать эти параметры. Однако возможности конструктивного изменения узлов, установленных ниже рабочих лопастей, ограничены требованиями к ним. Одним из обязательных требований является цент-



рация фрезера в скважине. Это возможно лишь при обеспечении диаметра, близкого к диаметру фрезеруемой обсадной колонны. Следовательно, диаметр можно уменьшать для элементов, не служащих для центрации. Уменьшение массы элементов, установленных под рабочими лопастями, ниже определенных значений также невозможно. При проектировании оборудования в первую очередь учитывают условия безопасной и безаварийной эксплуатации, а также обеспечения наилучших эксплуатационно-технических характеристик и лишь во вторую очередь стараются снизить массу элементов.

### Частота оборотов фрезера

Влияние частоты вращения фрезера на момент инерции также прямо пропорционально, однако частота вращения выбирается исходя из условия лучшего резания при работе и оптимальных условий для работы фрезерующих элементов, следовательно, не может быть изменена для снижения вероятности самопроизвольного отворота.

### Длина стружки

Значение длины стружки неопределенное и зависит от множества факторов, таких как материал обсадной колонны, срок ее эксплуатации, коррозионные и механические повреждения, осевая нагрузка на инструмент. Из этих параметров может быть проконтролирована и изменена только осевая нагрузка, однако она регламентируется компаниями-разработчиками инструмента и подбирается с учетом обеспечения лучшего резания обсадной колонны и необходимого ресурса режущих лопастей.

Формула (1) при  $n = 0$  позволяет наблюдать зависимость момента отворота от длины фрезеруемой стружки, на основании которой можно получить минимально допустимую длину стружки, при которой возможен отворот. Статистика по минимальной длине стружки должна собираться для одинаковой нагрузки на инструмент, для его одного типоразмера и одного типа фрезеруемой колонны. На основании собранных статистических данных в режиме реального времени по указанной зависимости можно контролировать момент инерции (рис. 4). Необходимо также отметить, что момент отворота на практике значительно ниже вследствие влияния вибрационных нагрузок, снижающих силу трения в соединении [5], и теплового воздействия [6].

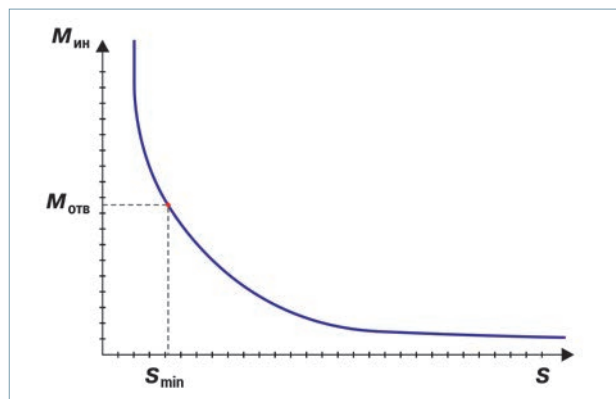


Рис. 4. Зависимость момента инерции  $M_{ин}$  от длины фрезеруемой стружки  $S$

### Выводы

1. Рассмотренная в статье причина, приводящая к самопроизвольному отвороту резьбового соединения, является значительной и в совокупности с вибрационными нагрузками и тепловым воздействием приводит к авариям, связанным с отворотом резьбового соединения.

2. Представленные в статье формула (1) и зависимость, приведенная на рис. 4, являются вспомогательным алгоритмом, позволяющим осуществлять сбор статистических данных и в конечном счете снизить вероятность самопроизвольного отворота элементов оборудования.

2. Фрезерование обсадной колонны — это сложный процесс, зависящий от множества факторов. Детальный контроль всех рассмотренных параметров может снизить вероятность самопроизвольного отворота элементов, установленных ниже рабочих лопастей. Однако даже это не позволит полностью исключить аварийные ситуации, связанные с отворотом.

4. Для детального изучения и контроля параметров работы фрезера требуется наличие высококвалифицированных специалистов, сопровождающих оборудование, что повышает стоимость фрезерования. Именно поэтому в настоящее время многие разработчики инструмента для фрезерования стараются фиксировать рассматриваемые элементы.

### Список литературы

1. Вспомогательный инструмент для бурения и ремонта скважин/Г.Г. Ишбаев, Р.Ф. Ташбулатов, Л.А. Алексеев (и др.). — Уфа: ООО Издательство «Нефтегазовое дело», 2007. — 138 с.
2. Справочное руководство по нефтепромысловым трубам/И.Ф. Пивоваров, А.Е. Сароян, Н.Д. Щербюк (и др.). — М.: Недра, 1967. — 596 с.
3. Соппротивление материалов/Г.С. Писаренко, В.А. Агареев, А.Л. Квитка (и др.). — Киев: Головное издательство издательского объединения Вища школа, 1986. — 775 с.
4. Экспериментальная проверка эффективности метода термодинамической обработки на строгальном станке/В.И. Котельников, А.О. Краснов, В.П. Кожемыкин, А.А. Миронов//Тр. ин-та/НГТУ. — 2012. — № 3. — С. 106–113.
5. Об износе оборудования в условиях вибрации и ударных нагрузок/И.И. Блехман, Л.И. Блехман, В.Б. Васильков (и др.)//Вестник научно-технического развития. — 2012. — № 11. — С. 3–14.
6. Биргер И.А., Исилевич Г.Б. Резьбовые и фланцевые соединения. — М.: Машиностроение, 1990. — 367 с.

### References

1. Ishbaev G.G., Tashbulatov R.F., Alekseev L.A. et al., *Vspomogatel'nyy instrument dlya bureniya i remonta skvazhin* (Auxiliary tools for well drilling and workover), Ufa: Neftgazovoe delo Publ., 2007, 138 p.
2. Pivovarov I.F., Saroyan A.E., Shcherbyuk N.D. et al., *Spravochnoe rukovodstvo po neftepromyslovym trubam* (Reference guide to oilfield pipes), Moscow: Nedra Publ., 1967, 596 p.
3. Pisarenko G.S., Agareev V.A., Kvitka A.L. et al., *Soprotivlenie materialov* (Strength of materials), Kiev: Vishcha shkola Publ., 1986, 775 p.
4. Kotelnikov V.I., Krasnov A.O., Kozhemyakin V.P., Mironov A.A., *Experimental verification of the effectiveness of the method of thermodynamic treatment in the planer* (In Russ.), Trudy Nizhegorodskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. R.E. Alekseeva = Transactions of Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.Y. Alekseev, 2012, no. 3, pp. 106–113.
5. Blekhan I.I., Blekhan L.I., Vasil'kov V.B. et al., *Wear and tear of machine parts affected by vibration and percussive impacts* (In Russ.), Vestnik nauchno-tekhnicheskogo razvitiya, 2012, no. 11, pp. 3–14.
6. Birger I.A., Isilevich G.B., *Rez'bovye i flantsevye soedineniya* (Threaded and flanged connections), Moscow: Mashinostroenie Publ., 1990, 367 p.