ВЛИЯНИЕ КОНФИГУРАЦИИ РЕГУЛЯРНОГО МИКРОРЕЛЬЕФА НА ПОВЕРХНОСТИ ПЛУНЖЕРА НА ВЕЛИЧИНУ ЗОНЫ ТУРБУЛЕНТНОГО ПОТОКА ЖИДКОСТИ

THE INFLUENCE OF REGULAR MICRORELIEF CONFIGURATION ON THE PLUNGER SURFACE AT TURBULENT FLOW ZONE VALUE

Р. Н. Бахтизин
Ramil N. Bakhtizin

Уфимский государственный
нефтяной технический университет,
г. Уфа, Российская Федерация

Ufa State Petroleum
Technological University,
Ufa, Russian Federation

К. Р. Уразаков
Kamil R. Urazakov

Уфимский государственный
нефтяной технический университет,
г. Уфа, Российская Федерация

Ufa State Petroleum
Technological University,
Ufa, Russian Federation

Б. М. Латыпов
Bulat M. Latypov

Уфимский государственный
нефтяной технический университет,
г. Уфа, Российская Федерация

Ufa State Petroleum
Technological University,
Ufa, Russian Federation

Б. Х. Ишмухаметов
Bulat Kh. Ishmukhametov

Уфимский государственный
нефтяной технический университет,
г. Уфа, Российская Федерация

Ufa State Petroleum
Technological University,
Ufa, Russian Federation

В статье рассмотрено влияние конфигурации регулярного микрорельефа на утечки откачиваемой жидкости через плунжерную пару штангового скважинного насоса. Для оценки влияния регулярного микрорельефа различного профиля на величину утечек жидкости через плунжерную пару и подбора его оптимального профиля, при котором утечки жидкости минимизируются, были поставлены следующие задачи: оценка влияния расстояния между канавками микрорельефа рабочих поверхностей плунжерной пары на величину гидравлических сопротивлений; определение зависимости коэффициента гидравлических сопротивлений единичной канавки на поверхности плунжера от числа Рейнольдса.

Показано, что нанесение микрорельефа в форме канавок на поверхность плунжера позволяет снизить критическое число Рейнольдса, при котором возникает турбулентный режим течения жидкости в кольцевом зазоре плунжерной пары.

На основе сравнительного анализа различных форм сечения канавок была рассмотрена канавка с сечением в виде прямоугольного треугольника. Проведено моделирование течения жидкости через зазор плунжерной пары при наличии канавок с сечением в форме прямоугольного треугольника, с использованием средств вычислительной гидродинамики.

Даны практические рекомендации по выбору геометрических параметров рассматриваемых канавок, при которых возникают максимальные гидравлические сопротивления жидкости при течении в зазоре плунжерной пары штангового скважинного насоса. На основе результатов численных экспериментов вычислительной гидродинамики установлена зависимость коэффициента гидравлических сопротивлений от числа Рейнольдса для канавки, создающей максимальные гидравлические сопротивления.

Ключевые слова

штанговый
насос,
плунжерная
пара,
регулярный
микрорельеф,
подача насоса,
утечки в зазоре,
канавки,
добыча нефти

The influence of a regular microrelief configuration on leakage of pumped liquid through a plunger pair of a sucker rod pump is considered in the article. To assess the effect of a regular microrelief of different profiles on the amount of fluid leakage through the plunger pair and the selection of its optimum profile, in which liquid leakages are minimized, the following tasks were set: an estimation of the influence of the distance between the grooves of the working surfaces microrelief of the plunger pair on the magnitude of the hydraulic resistances; determination of the dependence of the coefficient of hydraulic resistance of a single groove on the surface of the plunger on the Reynolds number.

It is shown that the application of the microrelief in the form of grooves on the surface of the plunger allows to reduce the critical Reynolds number at which a turbulent flow of fluid occurs in the annular gap of the plunger pair.

On the basis of a comparative analysis of the various forms of the groove section, a groove with a cross-section in the form of a rectangular triangle was considered. Modeling of fluid flow through the gap of the plunger pair in the presence of grooves, with a cross-section in the form of a rectangular triangle, using computational fluid dynamics is held.

Practical recommendations on the choice of geometric parameters of the grooves under consideration, at which maximum hydraulic fluid resistances occur during flow in the gap of the plunger pair of a sucker-hole pump are given.

On the basis of results of numerical experiments of computational fluid dynamics there was established the dependence of hydraulic resistance coefficient on the Reynolds number for the groove creating maximum hydraulic resistance.

Key words

sucker rod pump,
plunger pair,
regular
microrelief,
pump capacity,
gap leakage,
groove,
oil production

Наибольшее влияние на коэффициент подачи скважинного штангового насоса (СШН) оказывают утечки откачиваемой жидкости через зазор в плунжерной паре насоса. Уменьшением величины зазора можно минимизировать утечки жидкости, однако при этом возрастает риск заклинивания плунжера в цилиндре насоса, особенно при откачке обводненных нефтей.

Основными факторами, определяющими величину утечки откачиваемой жидкости через зазор, являются вязкость откачиваемой продукции, перепад давления на торцах плунжера и величина зазора. Перепад давления растет с увеличением глубины подвески насоса и с уменьшением давления на приеме насоса, что характерно для глубоких малобитных скважин. Величина зазора (группа посадки) погружного СШН подбирается с учетом перепада давления на торцах плунжера [1–4].

К прочим факторам относятся диаметр плунжера и длина плунжера. Вязкость откачиваемой жидкости увеличивает гидравлические сопротивления как в зазоре плунжерной пары, так и в подъемных трубах, поэтому с увеличением вязкости растет и перепад давления жидкости на торцах плунжера. При варьировании диаметра и длины плунжера насоса величина утечек изменяется в пределах одного порядка. Тем не менее, в скважинах с большим перепадом давления, как правило, используют плунжеры малых диаметров и увеличенной длины [5, 6].

Для уменьшения утечек через плунжерную пару в разное время предлагалось множество технических решений. Наиболее перспективным является нанесение регулярного микро рельефа (РМР) поверхности [7]. Нанесение РМР на поверхность плунжера обеспечивает увеличение гидравлических сопротивлений при течении жидкости в зазоре и раннюю турбулизацию потока при более низких числах Рейнольдса, что, в свою очередь, позволяет уменьшить величину утечек. Кроме того, во время работы пары «плунжер — цилиндр» в канавках РМР постоянно удерживается смазывающая жидкость, что приводит к снижению вероятности появления «сухого» трения и интенсивного износа, а также заклинивания плунжера.

В работах [8–12] плунжер насоса в соответствии с теоретическими расчетами был модифицирован нанесением на поверхности серии канавок в виде РМР, получаемых вдавливанием в металл плунжера шарика. Накатка проводилась выглаживателем с синтетическим алмазом при усилии прижатия наконечника 5–10 кгс и радиусе наконечника $R = 2$ мм. При этом образовывалась канавка, которая обеспечивала турбулизацию потока жидкости, проходящего через щель. Несмотря на то, что авторы исследований достигли желаемого эффекта, при нанесении РМР вдавливанием часть металла на поверхности плунжера образует наплывы, которые во время эксплуатации истираются, увеличивая зазор в плунжерной паре. В связи с этим в данных работах рассмотрены методы

нанесения РМР, при которых образуются профили канавок без наплывов.

В работах [13, 14] установлена оптимальная форма канавки в виде прямоугольного треугольника и были определены геометрические параметры канавки, обеспечивающей максимальное гидравлическое сопротивление течению жидкости в зазоре плунжерной пары величиной δ : длина канавки $L = 20\delta$ и глубина $H = L/2,5$. Компьютерным моделированием было установлено, что нанесение регулярного микрорельефа на плунжер в форме канавок с сечением прямоугольного треугольника, обеспечивает увеличение потерь давления при

фильтрации жидкости через зазор плунжерной пары на 25 % по сравнению с гладкой щелью, что позволяет значительно снизить утечки жидкости.

Для проведения экспериментальных исследований в данных работах была произведена оценка влияния расстояния между канавками на гидравлические сопротивления фильтрации жидкости в зазоре плунжерной пары. Расчетная схема поставленной задачи изображена на рисунке 1.

Исследования проводились для различных значений зазоров по группам посадки СШН (таблица 1).

Рисунок 1. Расчетные схемы для моделирования

Таблица 1. Группы посадок штангового скважинного насоса (ГОСТ31835-2012. Насосы скважинные штанговые. Общие технические требования)

Группа посадки	Минимальный зазор	Максимальный зазор с учетом допуска на изготовление цилиндра и плунжера
1	0,0	0,063
2	0,025	0,088
3	0,050	0,113
4	0,075	0,138
5	0,100	0,163

Значения зазоров составляли: 0,025; 0,05; 0,075; 0,1; 0,15; 0,2 мм.

При эксплуатации СШН режим течения жидкости через зазор плунжерной пары может быть ламинарным, переходным и турбулентным. Соответственно для моделирования течения жидкости в области ламинарного режима использовалась модель *laminar* (модель ламинарного течения), а для переходного течения и турбулентного использовалась модель SST (Shear Stress Transport — модель переноса сдвиговых напряжений для турбулентных течений) [15].

Задача решалась в плоском виде. На входе задавалась скорость течения $V_{вх}$, на выходе давление $P_{вых}$. В результате расчета определялся перепад давления до и после щели.

Размеры канавок для плунжерной пары с величиной зазора, равной δ , составляли: длина канавки $L = 20\delta$ и глубина $H = L/2,5$. Динамическая вязкость задавалась величиной от 0,001 до 0,01 Па·с, плотность от 850 до 1000 кг/м³. Число Рейнольдса варьировалось от 1000 до 3000 путем изменения заданной скорости потока жидкости на входе в щель и динамической вязкости фильтрационной жидкости.

Количество элементов расчетной сетки составляло от 100000 до 300000 элементов в зависимости от размеров канавки. Элементы использовались гексаэдрической формы. Толщина первого пристеночного слоя была задана величиной 0,0005 мм.

Результаты расчета для числа Рейнольдса, равного 1400, приведены на рисунке 2. При увеличении расстояния между канавками наблюдается интенсивный рост гидравлических сопротивлений. Это, вероятно, связано с тем, что канавки турбулизируют поток на ограни-

ченном пространстве, поэтому при перекрытии этих областей соседними канавками суммарный эффект, влияющий на гидравлическое сопротивление, снижается. Разница значений гидравлических сопротивлений при расстоянии 5 и 60δ составляет не более 5 %.

Рисунок 2. Зависимость расстояния между канавками от коэффициента гидравлических сопротивлений

В работе [11] для канавок различного профиля определено расстояние между канавками, при котором стабилизируется значение коэффициента гидравлического сопротивления, равное 40δ . Результаты моделирования фильтрации жидкости через щель с канавкой в форме прямоугольного треугольника в программе ANSYS CFX показывают удовлетворительную сходимость с результатами экспериментальных исследований, проведенных для канавок с другими профилями сечений.

Форма завихрений в канавках с идентичными геометрическими параметрами практически не отличается друг от друга (рисунок 3).

Фильтрация жидкости через плунжерную пару с канавкой в форме прямоугольного треугольника характеризуется формированием следующих гидравлических сопротивлений: расширение потока жидкости с одновременным его торможением, образование вихрей в полости канавки, внезапное сужение потока жидкости, отрыв потока жидкости от поверхности плунжера.

Для максимального увеличения гидравлических сопротивлений в зазоре плунжерной пары необходимо максимизировать число канавок на плунжере.

Рисунок 3. Контур скоростей слоев фильтрационной жидкости в зазоре плунжерной пары с двумя канавками

Математическая обработка результатов проведенных численных экспериментов позволила получить функциональную зависимость коэффициента гидравлических сопротивлений от числа Рейнольдса для диапазона чисел Рейнольдса от 1000 до 3000 для единичной канавки с сечением в виде прямоугольного треугольника:

$$\xi = a + b \cdot \text{Re} + c \cdot \text{Re}^2,$$

где $a = 1,48431$, $b = 0,000403449$, $c = -1,6816 \cdot 10^{-7}$ — коэффициенты полиномиальной регрессии. Коэффициент детерминации R^2 составил 0,887.

Зависимость 1, изображенная на рисунке 4, получена для канавки с оптимальными геометрическими параметрами.

Рисунок 4. Зависимость коэффициента гидравлических сопротивлений от числа Рейнольдса

Во всем диапазоне чисел Рейнольдса, значения которых возможны при эксплуатации штангового скважинного насоса при турбулентном режиме течения, величина коэффициента гидравлических сопротивлений больше 1.

Выводы

Результатами численных экспериментов вычислительной гидродинамики установлена зависимость коэффициента гидравлических сопротивлений от числа Рейнольдса для канавки, создающей максимальные гидравлические сопротивления, длиной $L = 20\delta$ и глубиной $H = L/2,5$.

Установлено, величина зоны турбулизации потока фильтрационной жидкости, образующейся в щели канавкой с длиной $L = 20\delta$ и глубиной $H = L/2,5$, составляет $(40-60)\delta$. Поэтому, при расположении нескольких канавок на меньшем расстоянии друг от друга, гидравлические потери при течении жидкости уменьшаются.

Установлено, величина зоны турбулизации потока фильтрационной жидкости, образующейся в щели канавкой с длиной $L = 20\delta$ и глубиной $H = L/2,5$, составляет $(40-60)\delta$. Поэтому, при расположении нескольких канавок на меньшем расстоянии друг от друга, гидравлические потери при течении жидкости уменьшаются.

СПИСОК ИСПОЛЪЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. McCaslin K.P. A Study of the Methods for Preventing Rod Wear Tubing Leaks in Sucker Rod Pumping Wells // SPE Production Operations Symposium, 8-10 March, 1987. Oklahoma City, Oklahoma, 1987. Available at: URL: <https://doi.org/10.2118/16198-MS>.
2. Cutler R.P., Mansure A.J. Fluid Dynamics in Sucker-Rod Pumps // Paper presented at the 1999 Southwestern Petroleum Short Course, Lubbock, Texas, 20-22 April, 1999.
3. Takacs G. Sucker-Rod Pumping Handbook: Production Engineering Fundamentals and Long-Stroke Rod Pumping. Oxford, US: Gulf Professional Publishing, 2015. 598 p.
4. Podio A.L, Gomez J., Mansure A.J., Williams B., Mahonet M. Laboratory-Instrumented Sucker-Rod Pump // J. SPE Production & Facilities. 2003. SPE-83674-PA.

5. Бахтизин Р.Н., Уразаков К.Р., Латыпов Б.М., Ишмухаметов Б.Х., Нарбутовских А.Ю. Влияние формы регулярного микрорельефа поверхности плунжера на утечки в штанговом скважинном насосе // Нефтяное хозяйство. 2017. № 4. С. 113–116. DOI: 10.24887/0028-2448-2017-4-113-116.
6. Писарик М.Н. Расчет утечек через зазор скважинного штангового насоса при откачке обводненной нефти // Нефтяное хозяйство. 1982. № 7. С. 49–50.
7. Бахтизин Р.Н., Исмагилов Ф.Г., Гафуров О.Г. Экспериментальное исследование плунжерной пары глубинного насоса с регулярным микрорельефом на поверхности плунжера // Нефтегазовое дело. 2008. Т. 6, № 2. С. 253–257.
8. Гурбанов Р.С., Мамедова М.А., Гурбанова Т.Г. Разработка способа уплотнения зазора насоса продукцией скважины // Восточно-европейский журнал передовых технологий. 2015. № 5/1 (77). С. 59–62.

9. Пат. 2193070 РФ, МПК 21 D 7/04. Устройство для обработки цилиндрических поверхностей деталей / И.И. Иконников, А.Э. Штайгервальд, К.Р. Уразаков, А.Г. Газаров. 2000111841/02, Заявлено 15.05.2000; Опубл. 20.11.2002. Бюл. № 32.

10. Исмагилов Ф.Г. Улучшение технических характеристик штангового насоса нанесением регулярного микрорельефа на поверхности плунжера: дис. ... канд. техн. наук. Уфа: УГНТУ, 2010. 136 с.

11. Никитин Г.А. Щелевые и лабиринтные уплотнения гидроагрегатов. М.: Машиностроение, 1982. 134 с.

12. Menter F.R., Kuntz M., Langtry R. Ten Years of Industrial Experience with the SST Turbulence Model // *Turbulence, Heat and Mass Transfer 4* / Ed.: K. Hanjalic, Y. Nagano, M. Tummers. Begell House, Inc., 2003. P. 625–632.

13. Захаров Б.С. Штанговые насосы с механическими уплотнениями // *Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса*. 2010. № 4. С. 18–21.

14. Захаров Б.С. Рекомендации по применению механических уплотнений в штанговых насосах // *Нефтепромысловое дело*. 2012. № 4. С. 35–37.

15. Бахтизин Р.Н., Уразаков К.Р., Латыпов Б.М., Ишмухаметов Б.Х. Утечки жидкости в штанговом насосе с регулярным микрорельефом на поверхности плунжера // *Нефтегазовое дело*. 2016. Т. 14, № 4. С. 33–39.

REFERENCES

1. McCaslin K.P. A Study of the Methods for Preventing Rod Wear Tubing Leaks in Sucker Rod Pumping Wells. *SPE Production Operations Symposium, 8–10 March, 1987*. Oklahoma City, Oklahoma, 1987. Available at: URL: <https://doi.org/10.2118/16198-MS>.

2. Cutler R.P., Mansure A.J. Fluid Dynamics in Sucker-Rod Pumps. *Paper Presented at the 1999 Southwestern Petroleum Short Course*, Lubbock, Texas, 20–22 April, 1999.

3. Takacs G. *Sucker-Rod Pumping Handbook: Production Engineering Fundamentals and Long-Stroke Rod Pumping*. Oxford, US, Gulf Professional Publishing, 2015. 598 p.

4. Podio A.L., Gomez J., Mansure A.J., Williams B., Mahonet M. Laboratory-Instrumented Sucker-Rod Pump. *J. SPE Production & Facilities*, 2003, SPE-83674-PA.

5. Bakhtizin R.N., Urazakov K.R., Latypov B.M., Ishmukhametov B.Kh., Narbutovskikh A.Yu. Vliyanie formy regul'yarnogo mikrorel'efa poverkhnosti plunzhera na utechki v shtangovom skvazhinnom nasose [The Influence of Regular Microrelief Forms on Fluid Leakage through Plunger Pair of Sucker Rod Pump]. *Neftyanoe khozyaistvo — Oil Industry*, 2017, No. 4, pp. 113–116. DOI: 10.24887/0028-2448-2017-4-113-116. [in Russian].

6. Pisarik M.N. Raschet utechek cherez zazor skvazhinного shtangovogo nasosa pri otkachke obvodnennoi

nefti [Calculation of Leaks through the Gap of the Downhole Sucker Rod Pump when Pumping out Watered Oil]. *Neftyanoe khozyaistvo — Oil Industry*, 1982, No. 7, pp. 49–50. [in Russian].

7. Bakhtizin R.N., Ismagilov F.G., Gafurov O.G. Eksperimental'noe issledovanie plunzhernoi pary glubinnogo nasosa s regul'yarnym mikrorel'efom na poverkhnosti plunzhera [Experimental Study of a Plunger Pair of a Deep Pump with a Regular Microrelief on the Plunger Surface]. *Neftgazovoe delo — Petroleum Engineering*, 2008, Vol. 6, No. 2, pp. 253–257. [in Russian].

8. Gurbanov R.S., Mamedova M.A., Gurbanova T.G. Razrabotka sposoba uplotneniya zazora nasosa produktsiei skvazhiny [Development of a Method for Sealing the Clearance of a Pump with Production of a Well]. *Vostochno-evropeiskii zhurnal peredovykh tekhnologii — Eastern European Journal of Advanced Technologies*, 2015, No. 5/1 (77), pp. 59–62. [in Russian].

9. Ikonnikov I.I., Shtaigerval'd A.E., Urazakov K.R., Gazarov A.G. *Ustroistvo dlya obrabotki tsilindricheskikh poverkhnostei detalei* [Device for Processing Cylindrical Surfaces of Parts]. Patent RF, No. 2193070, 2002. [in Russian].

10. Ismagilov F.G. *Uluchshenie tekhnicheskikh kharakteristik shtangovogo nasosa nanesseniem regul'yarnogo mikrorel'efa na poverkhnosti plunzhera: dis. kand. tekhn. nauk* [Improving the Technical Characteristics of the Sucker Pump by Applying a Regular Microrelief on the Plunger Surface. Cand. Engin. Sci. Diss.]. Ufa, UGNTU Publ., 2010. 136 p. [in Russian].

11. Nikitin G.A. *Shchelevye i labirintnye uplotneniya gidroagregatov* [Slotted and Labyrinth Seals of Hydraulic Units]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1982. 134 p. [in Russian].

12. Menter F.R., Kuntz M., Langtry R. Ten Years of Industrial Experience with the SST Turbulence Model. *Turbulence, Heat and Mass Transfer 4* (Ed.: K. Hanjalic, Y. Nagano, M. Tummers). Begell House, Inc., 2003, pp. 625–632.

13. Zakharov B.S. Shtangovye nasosy s mekhanicheskimi uplotneniyami [Sucker-Rod Pumps with Mechanical Seals]. *Oborudovanie i tekhnologii dlya neftegazovogo kompleksa — Equipment and Technologies for Oil and Gas Complex*, 2010, No. 4, pp. 18–21.

14. Zakharov B.S. Rekomendatsii po primeneniyu mekhanicheskikh uplotnenii v shtangovykh nasosakh [Recommendations on Usage of Mechanical Seals in Sucker-Rod Pumps]. *Neftpromyslovoye delo — Oilfield Engineering*, 2012, No. 4, pp. 35–37. [in Russian].

15. Bakhtizin R.N., Urazakov K.R., Latypov B.M., Ishmukhametov B.Kh. Utechki zhidkosti v shtangovom nasose s regul'yarnym mikrorel'efom na poverkhnosti plunzhera [Fluid Leakage in a Sucker-Rod Pump with Regular Micro-Relief at Surface of the Plunger]. *Neftgazovoe delo — Petroleum Engineering*, 2016, Vol. 14, No. 4, pp. 33–39. [in Russian].

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ABOUT THE AUTHORS

Бахтизин Рамиль Назифович, д-р физ.-мат. наук, профессор, ректор УГНТУ, г. Уфа, Российская Федерация

Ramil N. Bakhtizin, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Rector of USPTU, Ufa, Russian Federation

Уразакое Камил Рахматуллоевич, д-р техн. наук, профессор кафедры «Машины и оборудование нефтегазовых промыслов», УГНТУ, г. Уфа, Российская Федерация

Kamil R. Urazakov, Doctor of Engineering Sciences, Professor of Machinery and Equipment for Oil and Gas Industry Department, USPTU, Ufa, Russian Federation

e-mail: urazakk@mail.ru

Латыпов Булат Маратович, канд. техн. наук, доцент кафедры «Машины и оборудование нефтегазовых промыслов», УГНТУ, г. Уфа, Российская Федерация

Bulat M. Latypov, Candidate of Engineering Sciences, Assistant Professor of Machinery and Equipment for Oil and Gas Industry Department, USPTU, Ufa, Russian Federation

Ишмухаметов Булат Ханифович, аспирант кафедры «Машины и оборудование нефтегазовых промыслов» УГНТУ, г. Уфа, Российская Федерация

Bulat Kh. Ishmukhametov, Post-graduate Student of Machinery and Equipment for Oil and Gas Industry Department, USPTU, Ufa, Russian Federation

e-mail: bulatti@hotmail.com