SOCAR Proceedings

Reservoir and Petroleum Engineering

journal home page: <http://proceedings.socar.az>

ВЫСОКОЭФФЕКТИВНАЯ ПЕРФОРАЦИЯ ОБСАДНЫХ КОЛОН СКВАЖИН НЕФТИ И ГАЗА

В. Г. Погребняк*, И. И. Чудык, А. В. Погребняк, И. В. Перкун

Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа,
Ивано-Франковск, Украина

High-efficiency Casing Perforation Oil and Gas Wells

V. G. Pogrebnyak*, I. I. Chudyk, A. V. Pogrebnyak, I. V. Perkun

Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ivano-Frankivsk, Ukraine

Abstract

The energetic capabilities of a high-speed jet of an aqueous solution of polyethylene oxide (PEO) with varying concentration and different outflow pressures from a jet-forming nozzle were investigated using the length of the forming channel in the model of the casing of an oil and gas well, cement sheath and rock layer, as well as impact of the jet force on a metal plate fixed on a physical pendulum. The experimental data made it possible to obtain a calculated dependence in a dimensionless form to determine the quality (initial sections) of jets of aqueous solutions with different concentrations and molecular weights of PEO, considering the real parameters of the jet-forming nozzles of the hydroperforator. A comprehensive study of the perforation process made it possible to substantiate the mechanism of the high destructive capacity of a high-speed jet of polymer solution. It has been established that the mechanism of the high destructive capacity of the polymer water jet is not due to the Toms effect, but caused by the destructive action of the dynamic pressure of the polymer water jet «reinforced» by strongly unfolded macromolecular chains under the action of a tensile flow in the inlet area of the jet forming nozzle of the hydroperforator.

Keywords:

Perforator;
Jet nozzle;
Jet quality;
Casing;
Cement sheath;
Rock;
Toms effect.

© 2021 «OilGasScientificResearchProject» Institute. All rights reserved.

Введение

При бурении нефтяных или газовых скважин стенки их закрепляют обсадными колоннами, которые в области залегания нефтегазоносных пластов цементируют. Затем для создания возможности притока нефти и газа из пласта в обсадной колонне и окружающем ее цементном кольце напротив заданного участка продуктивного пласта создают ряд каналов (отверстий). Процесс создания отверстий, обеспечивающих сообщение между пластом и скважиной называют перфорацией скважин [1]. На практике наиболее часто работы по вскрытию продуктивных пластов выполняются кумулятивным способом перфорации скважин, который обеспечивает довольно большую длину каналов. Однако, этот способ влечет за собой увеличение негативного воздействия на прочность цементного камня и обсадную колонну, что может приводить к нару-

шению изоляции пластов. Чтобы этого избежать, используют щадящий способ перфорации – гидropескоструйный (ГПСР), т. е. перфорацию, когда в качестве прорезающей отверстия жидкости используется высокоскоростная струя с добавками абразива. Такая струя создает в обсадной колонне, цементном кольце и породе глубокий канал, обеспечивающий надежное сообщение между скважиной и пластом [2].

Однако этот способ имеет существенные недостатки: в процессе ГПСР, происходит интенсивный гидроабразивный износ внутренних поверхностей насосно-компрессорных труб, арматуры и оборудования, используемого при приготовлении и транспортировке рабочей жидкости; в результате гидроабразивного износа увеличивается диаметр и профиль отверстий насадок, которые формируют режущую струю, что приводит к уменьшению скорости гидроабразивной струи и, как следствие, к ухудшению ее разрушающей способности и увеличению общего времени перфорации; через гидроабразивный износ насадок

E-mail: vgpogrebnyak@gmail.com

<http://dx.doi.org/10.5510/OGP2021SI200578>

гидроперфоратора возникает необходимость в периодической их замене, что вызывает дополнительные затраты на сами насадки и на увеличение спуско-подъемных операций; глубокое проникновение абразивных частиц песка в породу при формировании каналов ухудшает отдачу пласта. Все это увеличивает ресурсоэнергоемкость процесса ГПСП скважин.

К решению проблемы разработки высокоэффективного способа перфорации скважин нефти и газа можно подойти, основываясь на результатах работы [3], в которой было показано, что малые полимерные добавки в высокоскоростную струю воды повышают ее разрушающую способность. То есть, режущую гидроабразивную струю необходимо заменить струей водного раствора полимера. При этом полимер должен быть безопасным веществом и разрешенным для использования в нефтегазовой отрасли. Таким полимером может быть полиэтиленоксид (ПЭО). ПЭО является безопасным веществом, которое используется как флокулянт для очистки и обеззараживания питьевой воды, в качестве загустителя в пищевой промышленности, в фармацевтических изделиях и другое [4, 5].

Результаты и их обсуждение

Перфорационные работы проводили на лабораторных стендах с использованием в качестве источника высокоскоростного потока жидкости гидростенда на основе установки УРГ-3020 с рабочим давлением до 500 МПа. Модель препятствия (мишени), на которой испытывали эффективность перфорации была сформирована в виде своеобразного «сэндвича», содержащего стальной лист толщиной $1 \cdot 10^{-2}$ м из стали (Ст Д), который моделирует обсадную колонну, слой бетона толщиной $2 \cdot 10^{-2}$ м аналог цементного кольца и слой породы в виде кернов. Общая толщина модели – 0.8 м. Результаты по формированию канала в модельном препятствии водополимерной струей с концентрацией ПЭО 0.0025% – 0.008% и мол. массой ПЭО $6 \cdot 10^6$, для давления истечения 200 МПа, диаметра выходного отверстия насадки $3 \cdot 10^{-3}$ м и времени перфорации 600 секунд приведены в табл. 1. Видно, что уменьшение концентрации ПЭО ниже 0.003% резко снижает эффективность процесса перфорации. Увеличение концентрации выше 0.007% не существенно влияет на эффективность формирования канала с точки зрения рационального использования ПЭО.

Данные характеризующие влияние давления истечения из струеформирующей насадки водного раствора ПЭО концентрации 0.005% приведены в табл. 2. Понижение давления ниже 100 МПа снижает эффективность перфорации, а увеличение более 300 МПа вызывает незначительный прирост длины канала, формируемого в модели препятствия, но приводит к техническим трудностям поддержания таких высоких давлений в производственных условиях. Перфорационные работы также проводили на аналогичной модели

Таблица 1
Влияние концентрации ПЭО в водополимерной струе на длину формируемого канала в модельном препятствии

№ опыта	С _{ПЭО} , %	Длина сформированного канала, м
1	0.0025	0.245
2	0.003	0.385
3	0.005	0.405
4	0.007	0.430
5	0.008	0.435

Таблица 2
Влияние давления струи 0.005% водного раствора ПЭО на длину формируемого канала в модельном препятствии

№ опыта	Давление, МПа	Длина сформированного канала, м
6	75	0.225
7	100	0.380
8	200	0.405
9	300	0.420
10	350	0.425

препятствия с использованием ГПСП (фракционный состав песка – $(0.5-1.2) \cdot 10^{-3}$ м, концентрация песка в струе – 30-50 кг/м³, давление истечения струи – 200 МПа). Получено, что длина канала в модельном препятствии составила $32 \cdot 10^{-2}$ м.

Сравнительный анализ данных, представленных в таблицах 1 и 2 показывает, что высокоскоростная струя водного раствора ПЭО в выбранном диапазоне концентраций и режимов формирования струи, обладает высокой разрушающей способностью и как следствие, эффективностью формирования каналов при перфорации скважин. Это указывает на особый механизм формирования каналов в препятствии, которое моделирует обсадную колонну, цементное кольцо и слой породы. Наши современные представления о процессе перфорации обсадных колонн скважин нефти и газа с использованием гидроструйной водополимерной перфорации далеки от совершенства. Для разработки высокоэффективного процесса водополимерной перфорации скважин необходимо установление условий формирования струи раствора при разных концентрациях и мол. массах полимера.

Эксперимент показал, что режим работы и параметры процесса взаимодействия водополимерной струи с разрушаемым препятствием непосредственно зависят от структуры (качества) струи и изменения её гидродинамических параметров. Изучение структуры и динамики даже водяной высокоскоростной струи [6], а тем

более водополимерной струи, – один из наиболее сложных вопросов гидродинамики [3]. Из-за особенностей движения жидкой струи в воздухе, а также отсутствия необходимой измерительной аппаратуры характеристики этих струй и их структура изучены недостаточно. Однако, имеющиеся результаты исследований водяных струй все же позволяют составить общее представление о тех процессах, которые происходят при формировании высокоскоростной струи и её истечении в атмосферу. Струя воды на выходе из насадки состоит из сплошной струи, которая расширяется по определенному закону, и капиллярного потока с плотностью, убывающей в радиальном направлении от оси струи. Непосредственно на выходе из насадки в водяной струе формируется ядро постоянных скоростей конусообразной формы, называемое начальным участком струи $l_{н,в}$ (рис. 1а). Вдоль длины начального участка имеет место потенциальное (безвихревое) течение воды [6–9].

За пределами начального участка струи в результате её расширения и распада осевая продольная скорость и динамическое давление постепенно уменьшаются по некоторой гиперболической зависимости, а динамическое давление и скорость в сечении струи резко снижаются от своего максимального значения до минимального в пограничной области. Этот участок струи (за пределами $l_{н,в}$), на котором струя сохраняет высокую плотность и компактность, называют основным участком струи [8]. В пределах основного участка сохраняется высокая плотность струи при низких значениях угла расширения границ водяной струи (рис. 1в).

Основной структурной характеристикой гидроструи является длина начального участка. С помощью безразмерной величины длины начального участка может быть интегрально оценено качество формирования водяной $l_{н,в}/d_{нас}$ и водополимерной струй $l_{н,с}/d_{нас}$ (где $d_{нас}$ – диаметр выходного отверстия насадки), которое зависит от формы профиля, а для водополимерной струи еще от мол. массы полимера и его концентрации. Фотографии струи водного раствора ПЭО свидетельствуют о том, что использование добавок ПЭО в воду приводит к существенному увеличению начального участка у водополимерной струи, который как уже отмечалось, характеризует качество ее формирования, и увеличению компактности за счет уменьшения ее диаметра (рис. 1б).

Уравнение для расчета безразмерной длины начального участка водяной струи имеет вид [9]:

$$\frac{l_{н,в}}{d_{нас}} = 25 \left(\frac{d_{нас}}{R_{аз}} \right)^{1/6} \lg K_{\Pi} \left(1 - 1,25 \exp \left(-0,095 \cdot \frac{l_{н,к}}{d_{н,к}} \right) \right) \quad (1)$$

где $R_{аз}$ – параметр шероховатости внутренней поверхности насадки, $l_{н,к}$ – длина проточной части подводящего канала насадки, $d_{н,к}$ – диаметр подводящего канала. Коэффициент поджатия

потока в насадке принимается равным 10 при $l_{н,к}/d_{нас} > 10$.

Сопоставление экспериментальных и расчетных значений безразмерной величины начальных участков водяной $l_{н,в}$ и водополимерной струй $l_{н,с}$ были выполнены с использованием экспериментально полученного распределения силы F действия водяной и водополимерной струй на металлическую пластину по оси потока (рис. 2). Полученные экспериментальные данные с достаточной точностью описываются следующим выражением:

$$\frac{l_{н,с}}{d_{нас}} = \frac{l_{н,в}}{d_{нас}} \cdot \dot{\epsilon} \cdot \theta_c \quad (2)$$

где $\dot{\epsilon}$ – продольный градиент скорости во входной области насадки; θ_c – время релаксации водного раствора ПЭО.

Подставив уравнение (1) в (2), получим уравнение для определения безразмерной величины начальных участков струй водных растворов ПЭО разных концентраций и мол. масс ПЭО с учетом реальных параметров струеформирующей насадки перфоратора в виде:

$$\frac{l_{н,с}}{d_{нас}} = 25 \left(\frac{d_{нас}}{R_{аз}} \right)^{1/6} \lg K_{\Pi} \left(1 - 1,25 \exp \left(-0,095 \cdot \frac{l_{н,к}}{d_{н,к}} \right) \right) \cdot \dot{\epsilon} \cdot \theta_c \quad (3)$$

При $\dot{\epsilon} \cdot \theta_c = 1$ начальный участок водополимерной струи $l_{н,с}$ равен начальному участку водяной струи $l_{н,в}$. Формула (3) имеет следующие границы применимости: водные растворы ПЭО должны удовлетворять критерию концентрированности [10] по Дебаю – $[\eta] \cdot C < 1$, а величина произведения продольного градиента скорости $\dot{\epsilon}$ во входной области струеформирующей насадки на время релаксации θ_c водного раствора ПЭО удовлетворять условию – $1 \leq \dot{\epsilon} \cdot \theta_c < 10$. Получено, что среднее значение коэффициента вариации при использовании зависимости (3) составило $K_{вар} = 13\%$, что свидетельствует о достаточной сходимости расчетных значений безраз-

Рис.1. Схема (а) структуры водополимерной струи, фотографии струи водного раствора ПЭО (б) и водяной струи (в), которые вытекают из насадки гидроперфоратора с диаметром $0,35 \cdot 10^{-3}$ м при давлении 100 МПа $M_{ПЭО} = 4 \cdot 10^6$, $C_{ПЭО} = 0,007\%$

Рис. 2. Распределение силы воздействия водяной струи (1), струи 0.003% водного раствора ПЭО (2) и 0.007% водного раствора ПЭО (3) на стальную пластину по оси потока при давлении 300 МПа
 $M_{пэо} = 4 \cdot 10^6$

мерных величин длин начального участка водополимерных струй с экспериментально полученными.

Размеры начального участка высокоскоростной струи жидкости имеют важное значение при разработке процесса гидроструйной водополимерной перфорации обсадных колонн скважин нефти газа. В первую очередь, от размеров начального участка струи водного раствора полимера будет зависеть длина формируемого канала, естественно, при давлении струи жидкости на единицу поверхности разрушаемого препятствия, превышающем предел его прочности.

В настоящее время полностью не выяснен характер изменения силы воздействия водополимерной струи в зависимости от удаления препятствия от насадки, формирующей высокоскоростную струю. По этому поводу даже для водяной струи существуют противоречивые точки зрения. Одни исследователи считают [11], что сила воздействия струи на препятствие существенным образом уменьшается с увеличением расстояния от среза насадки. Другие считают [8], что полная длина водяной струи может быть разбита на два участка: начальный участок, где сила воздействия струи на препятствие возрастает и достигает (на некотором расстоянии от насадки) максимального значения, и следующий участок, на всем протяжении которого эта сила сохраняется неизменной. Для водополимерных струй данные, показывающие зависимость сила воздействия струи на препятствие от расстояния до насадки, кроме работы [3], отсутствуют. Поэтому, опыты, о которых говорится ниже, были поставлены с целью установления особенностей динамики водополимерных струй, выяснив которые можно было бы разобраться в имеющихся противоречивых экспериментальных данных. Устранение данных противоречий необходимо для обоснования механизма повышенной разрушающей способности высокоскоростной струи водного раствора полимера, без чего невозможно установление

рациональных параметров высокоэффективного процесса перфорации обсадных колонн нефтегазовых скважин.

Энергетические возможности водополимерной струи оценивались по измеряемой силе воздействия струи на стальную (Ст 3) пластину, на которую были закреплены тензодатчики. Результаты, которые показывают развитие силы воздействия гидроструи с разным содержанием ПЭО на препятствие по оси потока в безразмерных координатах представлены на рисунке 2. Полученные экспериментальные данные описываются, по крайней мере, двумя участками с линейным изменением силы воздействия гидроструи на препятствие. Видно, что максимальное значение силы воздействия F_{max} водополимерной струи на плоское препятствие зависит от концентрации ПЭО в водополимерной струе и находится в интервале безразмерных расстояний от насадки $30 < l/d_{nac} < 300$ (где l – расстояние от среза насадки до препятствия). Сравнение распределения силы действия водополимерной струи на препятствие по оси потока (рис. 2) с её структурными особенностями (рис. 1, б) показывает, что область $l/d_{nac} < 100$ относится к начальному участку струи, а область $30 < l/d_{nac} < 300$ – к основному участку.

Экспериментальные данные по динамике водополимерной струи целиком объясняют характер изменения разрушающих свойств струи в зависимости от расстояния между поверхностью препятствия и срезом насадки. Становится понятным, почему в одних случаях глубина формирования канала с увеличением диаметра насадки гидроперфоратора возрастает, а в других – уменьшается. Учитывая данные рисунка 2, приходим к выводу, что если расстояние от насадки до поверхности препятствия меньше размеров начального участка водополимерной струи, то увеличение диаметра выходного отверстия насадки будет приводить к уменьшению длины канала, который формируется в процессе гидроперфорации обсадной колонны скважины. Если же расстояние от насадки до поверхности препятствия приближается к размерам основного участка водополимерной струи или превышает его, то тогда глубина канала будет возрастать с увеличением диаметра насадки при неизменном перепаде давления.

Относительно механизма высокой разрушающей способности струи раствора полимера нет однозначной точки зрения. В одних работах [12] повышенная разрушающая способность водяной струи с полимерными добавками объясняется проявлением эффекта Томса [13, 14]. Исходя из этого, утверждается, что водяная струя с малыми добавками полимера имеет большую скорость и динамическое давление, чем струя чистой воды, при одинаковых перепаде давления и диаметре насадки, а следовательно, интенсивнее разрушает материал. В работе [15] высокая разрушающая способность высокоскоростной струи рас-

творения полимера связывается с деформационными эффектами, проявляющимися при течении с растяжением водных растворов полимеров. Ниже речь пойдет об опытах, которые были поставлены с целью внесения большей ясности в вопрос механизма повышенной разрушающей способности водополимерных струй.

Для качественной оценки энергетических возможностей струи в опытах изучали взаимодействие струи с мишенью, установленной на физическом маятнике. Мишень была изготовлена из стальных (Ст 3) листов размерами $(220 \times 220 \times 3) \cdot 10^{-3}$ м с крепежными отверстиями $16 \cdot 10^{-3}$ м по углам. Между плоскостью мишени и телом физического маятника был зазор $5 \cdot 10^{-2}$ м [3]. Использовали полиэтиленоксид молекулярной массы $6 \cdot 10^6$.

Данные опытов представлены в таблице 3, откуда видно, что максимальное расстояние от насадки формирующей струю до мишени, когда еще наблюдается её пробой, составляет для воды 1.5 м, а для 0.0008 %-ного водного раствора полимера – 2.5 м; проявление эффективности полимерных добавок наблюдалось с концентраций 0.004 %; полимерные добавки снижают среднюю скорость водополимерной струи ~ 9% (ошибка измерения ~ 1 %) относительно скорости водяной струи. Снижение средней скорости струи раствора полимера показывает, что природа высокой разрушающей способности струи воды с малыми полимерными добавками не обусловлена эффектом Томса. То есть, несмотря на снижение скорости струи водного раствора ПЭО её разрушающая способность значительно выше водяной струи.

В работах [16,17] доказана возможность почти полного разворачивания макромолекул при сходящемся течении (в модельных условиях насадки гидроперфоратора) водных растворов ПЭО при достижении некоторого критического продольного градиента скорости и, как следствия этого, фазового перехода клубок-развернутая цепь. Отношение измеренного двойного лучепреломления к предельно возможному достигает 0.35–0.46, что соответствует 60-70% степени развернутости макромолекулярного клубка. Также доказано, что система вода-полимер в условиях течения через модельную насадку при определенных режимах является саморегулируемой с отрицательными обратными связями. Последнее проявляется в следующем: растущие продольные градиенты скорости приводят к деформации

макромолекулярных клубков, а это в свою очередь вызывает перестройку структуры потока во входной области струеформирующей насадки, чтобы уменьшить продольные градиенты скорости [18]. Последние не могут быть ниже некоторых критических значений, достаточных для разворачивания макромолекул. Если они все же окажутся ниже, то макромолекулы полимера сворачиваются и перестают влиять на поле скоростей, при этом резко возрастает градиент скорости, а это приведет к существенной деформации макромолекулярных клубков, и все повторится снова. То есть, система вода-полимер сама выбирает такой минимальный градиент скорости, который был бы достаточен для разворачивания макромолекулярных клубков полимера.

Учитывая результаты работ [16,19], полученные экспериментальные данные (табл. 1-3) вполне объясняются с точки зрения сильного деформационного воздействия гидродинамического поля на молекулярные клубки в условиях входной области насадки. Если вычислить продольный градиент скорости, реализуемый в конфузорной насадке (при течении ньютоновской жидкости), то оказывается, что он не превысит (в наших опытах) $2 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$, т.е., несмотря на столь высокие скорости ($\bar{u} \sim 250 \text{ м/с}$) и, следовательно, большие сдвиговые градиенты скорости, условия деформирования макромолекул в конусной насадке гидроперфоратора и во входной области модельной насадки с прямоугольным входом [16, 20] практически совпадают. Это указывает на то, что при течении полимерного раствора в насадке макромолекулы, как и в случае во входной области модельной насадки, подвергаются сильному деформационному воздействию продольного гидродинамического поля, поскольку реализуемые при этом градиенты скорости выше критических значений, достаточных для разворачивания макромолекул. Поэтому выходящая струя раствора полимера оказывается «армированной» сильно развернутыми макромолекулярными цепями. Часть энергии идет на структурную перестройку потока во входной области струеформирующей насадки [16,20], что и обуславливает снижение средней скорости струи (табл. 3) и её высокую компактность (рис. 1б). Последнее способствует увеличению предельного расстояния, с которого еще происходит разрушение стальной мишени и, естественно, к формированию более длинных каналов при перфорации нефтегазовых скважин.

Таблица 3

Влияние концентрации ПЭО в водополимерной струе на её скорость и расстояния от среза насадки до мишени на характер её взаимодействия с мишенью

$C_{\text{ПЭО}}, \%$	Расстояние до мишени, м	Средняя скорость струи, м/с	Характер пробоя мишени
0	1.5	250	Диаметр отверстия $(15-18) \cdot 10^{-3}$ м, края рваные
0	1.75	250	Нет пробоя
0	2.5	250	Нет пробоя
0,0004	1.5	240	Диаметр отверстия $(15-18) \cdot 10^{-3}$ м, края рваные
0,0004	2	235	Нет пробоя
0,0008	2.5	230	Диаметр отверстия $(8-10) \cdot 10^{-3}$ м, края ровные

Обозначения

$l_{н,в}$ – начальный участок струи воды, м;
 $d_{нас}$ – диаметр выходного отверстия струеформирующей насадки, м;
 $l_{н,с}$ – начальный участок струи водного раствора полимера, м;
 $R_{аз}$ – параметр шероховатости внутренней поверхности струеформирующей насадки, м;
 $l_{н,к}$ – длина проточной части подводящего канала струеформирующей насадки, м;
 $d_{н,к}$ – диаметр подводящего канала струеформирующей насадки;
 $K_{п}$ – коэффициент поджатия потока в струеформирующей насадке;
 $\dot{\epsilon}$ – продольный градиент скорости во входной области насадки, с^{-1} ;
 θ_c – время релаксации водного раствора ПЭО, с;
 $M_{\text{ПЭО}}$ – молекулярная масса полимера, а.е.м.;
 $C_{\text{ПЭО}}$ – концентрация раствора полимера, %;
 C – концентрация раствора полимера, $\text{кг}/\text{м}^3$;
 $[\eta]$ – характеристическая вязкость раствора полимера, $\text{м}^3/\text{кг}$;
 l – расстояние от среза насадки до препятствия, м.

Индексы

$н,в$ – относится к начальному участку водяной струи;
 $н,с$ – относится к начальному участку струи водного раствора полимера;
 $нас$ – относится к струеформирующей насадке;
 $н,к$ – относится к подводящему каналу струеформирующей насадки;
 $п$ – относится к коэффициенту поджатия потока;
 $пэо$ – относится к мол. массе и концентрации ПЭО.

Выводы

1. Полученные экспериментальные данные подтверждают обоснованность необходимости использования структурных и динамических характеристик водополимерных струй при установлении рациональных параметров гидроперфоратора и максимальной продуктивности перфорации скважин нефти и газа.

2. Рассмотренные опыты свидетельствуют об определяющей роли реализуемого при течении продольного градиента скорости в деформировании молекулярных клубков и незначительной роли сдвигового градиента скорости. Этот факт является важным условием, которое необходимо учитывать при расчете конфигурации насадок гидроперфоратора и режимов гидроперфорации обсадных колон скважин высокоскоростной струей водного раствора полимера.

3. Установлено, что механизм высокой разрушающей способности водополимерной струи не обусловлен эффектом Томса, а заключается в разрушающем действии динамического давления водополимерной струи «армированной» сильно развернутыми макромолекулярными цепями под действием растягивающего течения во входной области струеформирующей насадки гидроперфоратора.

Литература

1. Бойко, В. С., Кондрат, Р. М., Яремійчук, З. С. (1996). Довідник з нафтогазової справи. Львів: ІФНТУНГ.
2. Чорний, М. І., Чорний, О. М., Метешоп, І. М., Кузів, І. М. (2013). Геологічні основи розкриття і випробування продуктивних пластів. Івано-Франківськ: ІФНТУНГ.
3. Погребняк, В. Г., Наумчук, Н. В. (1995). О гидродинамической активности полимеров в высокоскоростных потоках. *Инженерно-физический журнал*, 68(1), 146–148.
4. (1967). Encyclopedia of polymer science and technology. Vol. 6 /ed. by Mark, H. New York: John Wiley.
5. Саянов, В. И., Скурыдин, С. Г. (1978). О связи между строением водных растворов полиэтиленгликоля и компактизацией двухцепочечных молекул ДНК. *Молекулярная биология*, 12(3), 485–495.
6. Никонов, Г. П., Шавловский, С. С., Хныкин, В. В. (1969). Исследование динамики и структуры тонкой струи воды с давлением 500 ат. Москва: ИГД им. А. А. Скочинского.
7. (2009). Научная школа Ивана Лукича Повха (к 100-летию со дня рождения) /под общ. ред. Ступина, А. Б. Донецк: ДонНУ.
8. Бреннер, В. А., Жабин, А. Б., Пушкарев, А. Е., Щеголевский, М. М. (2000). Гидроструйные технологии в промышленности. Гидромеханическое разрушение горных пород. Москва: Академия горных наук.
9. Мерзляев, В. Г., Бафталовский, В. Е. (2004). Физико-технические основы гидроструйных технологий в горном производстве. Москва: ИГД им. А. А. Скочинского.
10. Френкель, С. Я., Ельяшевич, Г. К., Панов, Ю. Н. (1970). Концентрированные растворы полимеров. Успехи химии и физики полимеров. Москва: Химия.
11. Рабинович, Е. З. (1974). Гидравлика. Москва: Недра.
12. Кузмин, Р. А., Тихомиров, Р. А., Кравченко, Д. В. (2002). О преимуществах гидрорезания материалов струей жидкости с добавками водорастворимых полимеров. Материалы Всероссийской научно-технической конференции «Аэрокосмические технологии и образование на рубеже веков». Часть 2. Москва: РГАТА, Рыбинск.
13. Povkh, I. L., Pogrebnyak, V. G., Toryanik, A. I. (1979). Relation between molecular structure of polyethyleneoxide and drag reduction. *Journal of Engineering Physics*, 37(4), 1131–1136.
14. Пилипенко, В. Н. (1980). Влияние добавок на пристенные турбулентные течения. Итоги науки и техники. Серия «Механика жидкости и газа». Выпуск 15. Москва: ВИНТИ.
15. Погребняк, А. В. (2008). Высокоэффективное гидрорезание твердых пищевых продуктов и материалов. Управление реологическими свойствами пищевых продуктов. Москва: МГУПП.
16. Pogrebnyak, A., Chudyk, I., Pogrebnyak, V., Perkun, I. (2019). Coil-uncoiled chain transition of polyethylene oxide solutions under convergent flow. *Chemistry and Chemical Technology*, 13(4), 465–470.
17. Pogrebnyak, A. V., Perkun, I. V., Pogrebnyak, V. G. (2017). Degradation of polymer solutions in a hydrodynamic field with a longitudinal velocity gradient. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 90(5), 1219–1224.
18. Иванюта, Ю. Ф., Погребняк, В. Г., Френкель, С. Я. (1992). Структура гидродинамического поля и деформационное поведение макромолекул при сходящемся течении. *Высокомолекулярные соединения. Серия А*, 34(3), 133–138.
19. Ivanyuta, Yu. F., Naumchuk, N. V., Pogrebnyak, V. G., Frenkel', S. Ya. (1985). Flow structure of aqueous solutions of polyethylene oxide in the inlet region of short capillaries. *Journal of Engineering Physics*, 49(4), 1192–1197.
20. Бресткин, Ю. В., Агранова, С. А., Дьякова, Н. Е. (1989). Эффекты ДЛП полимерных растворов в продольном гидродинамическом поле. *Высокомолекулярные соединения. Серия В*, 31(11), 844–846.
21. Pogrebnyak, V. G., Pogrebnyak, A. V., Perkun, I. V. (2021). Maxwell fluid flow in system supplying hydrodynamically active polymer to boundary layer of streamlined object. *Mathematical Modeling and Computing*, 8(1), 58–68.

References

1. Boiko, V. S., Kondrat R. M., Yaremiichuk Z. S. (1996). Dovidnyk z naftohazovoi spravy. *Lviv: IFNTUNH*.
2. Chornyi, M. I., Chornyi, O. M., Metoshop I. M., Kuziv I. M. (2013). Heolohichni osnovy rozkryttia i vyprobuvannia produktyvnykh plastiv. *Ivano-Frankivsk: IFNTUNH*.
3. Pogrebnyak, V. G., Naumchuk, N. V. (1995). O gidrodinamicheskoy aktivnosti polimerov v vyisokoskorostnykh potokakh. *Inzhenerno-Fizicheskii Zhurnal*, 68(1), 146–148.
4. (1967). Encyclopedia of polymer science and technology. Vol. 6 /ed. by Mark, H. *New York: John Wiley*.
5. Salyanov, V. I., Pogrebnyak, V. G., Skuryidin, S. G. (1978). O svyazi mezhdru stroeniem vodnykh rastvorov polietilenglikolya i kompaktizatsiei dvuhtsepochechnykh molekul DNK. *Molekulyarnaya Biologiya*, 12(3), 485–495.
6. Nikonov, G. P., Shavlovskiy, S. S., Hnyikin, V. V. (1969). Issledovanie dinamiki i struktury tonkoy strui vodyi s davlenim 500 at. *Moskva: IGD im. A. A. Skochinskogo*.
7. (2009). Nauchnaya shkola Ivana Lukicha Povha (k 100-letiyu so dnya rozhdeniya) /pod obsch. red. Stupina, A. B. *Donetsk: DonNU*.
8. Brenner, V. A., Zhabin, A. B., Pushkarev, A. E., Schegolevskiy, M. M. (2000). Gidrostruynnye tehnologii v promyshlennosti. Gidromekhanicheskoe razrushenie gornyykh porod. *Moskva: Akademiya gornyykh nauk*.
9. Merzlyaev, V. G., Baftalovskiy, V. E. (2004). Fiziko-tehnicheskie osnovyi gidrostruynykh tehnologiy v gornom proizvodstve. *Moskva: IGD im. A. A. Skochinskogo*.
10. Frenkel, S. Ya., Elyashevich, G. K., Panov, Yu. N. (1970). Kontsentrirrovannyye rastvoryi polimerov. Uspehi himii i fiziki polimerov. *Moskva: Himiya*.
11. Rabinovich, E. Z. (1974). Gidravlika. *Moskva: Nedra*.
12. Kuzmin, R. A., Tihomirov, R. A., Kravchenko, D. V. (2002). O preimushchestvakh gidrorezaniya materialov struey zhidkosti s dobavkami vodorastvorimyykh polimerov. Materialy Vserossiyskoy nauchno-tehnicheskoy konferentsii «Aerokosmicheskie tehnologii i obrazovanie na rubezhe vekov». *Moskva: RGATA, Rybinsk*.
13. Povkh, I. L., Pogrebnyak, V. G., Toryanik, A. I. (1979). Relation between molecular structure of polyethyleneoxide and drag reduction. *Journal of Engineering Physics*, 37(4), 1131–1136.
14. Pilipenko V. N. (1980). Vliyanie dobavok na pristennyie turbulentnyie techeniya. Itogi nauki i tekhniki. Seriya «Mekhanika zhidkosti i gaza». *Moskva: VINITI*.
15. Pogrebnyak, A. V. (2008). Vyisokoeffektivnoe gidrorezanie tverdykh pishevykh produktov i materialov. Upravlenie reologicheskimi svoystvami pishevykh produktov. *Moskva: MGUPP*.
16. Pogrebnyak, A., Chudyk, I., Pogrebnyak, V., Perkun, I. (2019). Coil-uncoiled chain transition of polyethylene oxide solutions under convergent flow. *Chemistry and Chemical Technology*, 13(4), 465–470.
17. Pogrebnyak, A. V., Perkun, I. V., Pogrebnyak, V. G. 2017. Degradation of polymer solutions in a hydrodynamic field with a longitudinal velocity gradient. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 90(5), 1219–1224
18. Ivanyuta, Yu. F., Naumchuk, N. V., Pogrebnyak, V. G., Frenkel', S. Ya. (1985). Flow structure of aqueous solutions of polyethylene oxide in the inlet region of short capillaries. *Journal of Engineering Physics*, 49(4), 1192–1197.
19. Brestkin, Yu. V., Agranova, S. A., Dyakova, N. E., Pogrebnyak, V. G. (1989). Effektyi DLP polimernykh rastvorov v prodolnom gidrodinamicheskome pole. *Vyisokomolekulyarnye Soedineniya, B*, 31(11), 844–846.
20. Pogrebnyak, A. V., Perkun, I. V., Pogrebnyak, V. G., Shimanskii, V. Y. (2021). Thermal effects in the flow of a polymer aqueous solution through a hydrocutting jet-forming head. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 94(1), 137–142.
21. Pogrebnyak V. G., Pogrebnyak A. V., Perkun I. V. (2021). Maxwell fluid flow in system supplying hydrodynamically active polymer to boundary layer of streamlined object. *Mathematical Modeling and Computing*, 8(1), 58–68.

Высокоэффективная перфорация обсадных колонн скважин нефти и газа

В. Г. Погребняк., И. И. Чудык, А. В. Погребняк, И. В. Перкун
Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа,
Ивано-Франковск, Украина

Реферат

Исследованы энергетические возможности высокоскоростной струи водного раствора полиэтиленоксида (ПЭО) при вариации концентрации и разных давлениях истечения с струеформирующей насадкой, которые оценивались по длине формирующегося канала в модели обсадной колонны нефтегазовой скважины, цементного кольца и слоя породы, а также по силе воздействия струи на металлическую пластину закрепленную на физическом маятнике. Экспериментальные данные позволили получить расчетную зависимость в безразмерном виде для определения качества (начальных участков) струй водных растворов разных концентраций и молекулярных масс ПЭО с учетом реальных параметров струеформирующих насадок гидроперфоратора. Комплексное изучение процесса перфорации позволило обосновать механизм высокой разрушающей способности высокоскоростной струи раствора полимера. Установлено, что механизм высокой разрушающей способности водополимерной струи не обусловлен эффектом Томса, а заключается в разрушающем действии динамического давления водополимерной струи «армированной» сильно развернутыми макромолекулярными цепями под действием растягивающего течения во входной области струеформирующей насадки гидроперфоратора.

Ключевые слова: гидроперфоратор; струеформирующая насадка; качество струи; обсадная колонна; цементное кольцо; порода; эффект Томса.

Neft və qaz quyularının qoruyucu kəmərlərinin yüksək effektivlikli perforasiyası

V. G. Poqrebnyak, İ. İ. Çudık, A. V. Poqrebnyak, İ. V. Perkun
İvano-Frankivsk Milli Texniki Neft və Qaz Universiteti,
İvano-Frankovsk, Ukrayna

Xülasə

Polietilen oksid (PEO) məhlulunun yüksək sürətli şırnağının imkanları müxtəlif qatılıqlar və şırnaq əmələgətirən ucluqların müxtəlif axın təzyiqlərində tədqiq edilmişdir. Bu zaman neft-qaz quyularının qoruyucu kəmərinə, sement halqasında və süxurda yaradılmış kanalın uzunluğu və şırnağın fiziki rəqqasə bərkidilmiş metal lövhəyə təsir qüvvəsi analiz olunmuşdur. Təcrübələr nəticəsində hidroperforatorun şırnaq əmələ gətirən ucluqlarının parametrlərinin real qiymətlərində müxtəlif qatılıqlar və molekulyar kütləyə malik PEO-nun şırnağın keyfiyyətinə təsirini ifadə edən ölçüsüz kəmiyyət əldə olunmuşdur. Perforasiya prosesinin kompleks tədqiqi polimer məhlulunun yüksək sürətli şırnağının yüksək dağıdıcılıq qabiliyyətini əsaslandırmağa imkan verir. Müəyyən edilmişdir ki, polimer məhlulunun şırnağının yüksək dağıdıcılıq qabiliyyəti Toms effekti ilə deyil, hidroperforatorun şırnaq əmələ gətirən ucluqlarının giriş sahəsində yaranmış makromolekullar ilə gücləndirilmiş polimer məhlulunun özlü axınının dağıdıcı təsiri ilə izah olunur.

Açar sözlər: hidroperforator; şırnaq əmələ gətirən ucluq; şırnağın keyfiyyəti; qoruyucu kəmə; sement halqası; süxur; Toms effekti.