

И.Н. Карелин, д-р техн. наук (РГУ нефти и газа (НИУ) им. И.М. Губкина),
В.Д. Седых, д-р физ.-мат. наук (РГУ нефти и газа (НИУ) им. И.М. Губкина)
Л.В. Седых, доцент (НИТУ «МИСиС»)

ОСОБЕННОСТИ ПРОИЗВОДСТВА ИННОВАЦИОННОГО ЭЛЕМЕНТА ГАЗОНЕФТЯНОГО ТРУБОПРОВОДА

«А воз и ныне там.»
А.И. Крылов

Открытость экологических проблем в российском обществе, осознание ответственности перед будущими поколениями и современный акцент на развороте в стране импортозамещении оборудования сырьедобывающих отраслей актуализируют вопросы промышленной безопасности нефтегазового оборудования. В настоящее время в связи с масштабностью объектов и перспективных проектов значительное внимание уделяется экологической безопасности магистральных и технологических трубопроводов как в газовой [1], так и в нефтяной [2] отраслях.

В этих отраслях функционируют такие виды оборудования, где технологический режим эксплуатации предусматривает неизбежный контакт с рабочими средами, включающими механические примеси в сверхнормативных концентрациях. И прежде всего – это технологические системы трубопроводных обвязок:

- бурового оборудования;
- фонтанного и насосного оборудования добычи полезных ископаемых;
- установок комплексной подготовки нефти или газа;
- компрессорных или нефтеперекачивающих станций;
- подземных хранилищ природного газа и др.

Рассматриваемые обвязки комплектуются, как правило, малоразмерными ($DN \leq 150$ мм) стандартными, специальными и фасонными элементами газонефтяных трубопроводов (далее ЭГНТ), т.е. запорными и регулируемыми устройствами, отводами, тройниками и т.п., высокого условного давления

($PN \geq 6,4$ МПа) в целях изменения расхода, давления или направления потока рабочей среды. А в сопроводительных технических документах на эти изделия, как правило, воспроизводятся требования к рабочим средам из отраслевых нормативных документов на среды, т.е. предельно допустимое содержание мехпримесей – 10 мг/м³ для газа и 0,010% для нефти. Поэтому реальные условия эксплуатации подобных изделий представляют собой потенциальный источник нарушения экологической (и не только) безопасности.

Периодически повторяющиеся до сих пор аварии на газонефтяных производственных объектах, информация о которых становится известной даже из СМИ [3-5], и менее значимый негатив, так и не «заслуживший» их внимания, подтверждают указанный потенциал. При этом интересно отметить и тот факт, что принятая в газовой отрасли типовая программа и методика приемочных испытаний трубопроводных устройств на полигоне испытательной лаборатории ООО «Саратоворгниагностика» предусматривает для моделирования реальных условий эксплуатации наличие в потоке испытательной среды механических примесей в виде песка, сварочного графа до 2 мм и кусков электродов до 20 мм диаметром 3 мм. Сварочный грат и куски электродов, как известно, характерны как для вновь сооружаемых, так и для ремонтируемых участков трубопроводов.

В такой ситуации нечастые случаи проектирования и изготовления ЭГНТ под нормативные концентрации загрязнений (например, под СТО Газпром 2-4.1-212-2008), а иногда и без их ограничений [6] однозначно приводит к отказам (рис.1) [7].



Рис. 1 Общий вид регулирующего устройства и его отказавшие функциональные детали

В большинстве же случаев с учетом отмеченной специфики приемочных испытаний трубопроводных изделий для нужд газовой промышленности наиболее распространенным путем повышения их долговечности считается применение защитных материалов, наплавов, покрытий на изнашиваемых поверхностях деталей. И даже считающаяся «панaceей» у зарубежных специалистов наплавка стеллитом эффективно проблемы не решает.

Перспективным направлением решения данной проблемы явилась серия отечественных научно-технических работ, объединенных в инновационный подход к проектированию нефтегазовой трубопроводной арматуры для загрязненных сред [8]. В ее основу положен достаточно универсальный методологический принцип разделения функций в конструктивных схемах таких изделий, реализация которого позволила разработать целый ряд оригинальных технических решений. С научным, практическим и экономическим доказательством эффективности на конкретных опытных образцах газонефтяных трубопроводных изделий проделанная за три десятилетия работа оставалась за пределами интересов отечественного производителя по причинам, не связанным с сущностью инноваций.

В связи с этим в настоящей работе представлен из ряда выходящий случай интереса отечественного производителя к одному из инновационных технических решений [9]. Такой прецедент послужил побудительной причиной проведения более глубоких исследований как самого объекта производства, так и корректности формулы изобретения.



Рис. 2 Отказавший крутоизогнутый отвод газонефтяного трубопровода

В запатентованном техническом решении защиты крутоизогнутого отвода газонефтяного трубопровода от возникновения свища в его стенке (рис. 2) был реализован принцип разделения функций путем введения в конструкцию дополнительной детали. Решающим аргументом для завода в пользу изготовления опытного образца износостойкого отвода стала простота варианта конструкции стального крутоизогнутого отвода с углом 90° с размещенной внутри вдоль оси отвода лопаткой с плоской поверхностью, спрофилированной по винтовой линии с углом поворота 180° . Выбранная конструкция соответствовала одному из предпочтительных вариантов формулы изобретения, представленного в описании чертежом (рис. 3).



Рис. 3 Схема предпочтительного варианта формулы изобретения [9]

В технологической реализации изделие для предприятия трудности не представляло. И для оценки эффективности этого изобретения опытный образец был отправлен на эксплуатационные испытания в одно из производственных подразделений ПАО «Газпром». Результат испытаний оказался отрицательным (рис. 4) и вся информация об испытаниях и изготовлении была направлена авторам изобретения.



Рис. 4 Виды испытанного отвода заводского исполнения

Проведенный авторами тщательный анализ представленной информации показал следующее. Опытный образец изделия был изготовлен на заводе из стандартного отвода 90° 108x4 ГОСТ 17375-2001. Поскольку в описании изобретения [9] лопатка предлагалась из керамического материала на заводе она не была признана технологичной. В качестве заготовки приняли стальную полосу и лопатку изготовили в точном соответствии с вышеуказанным предпочтительным вариантом формулы изобретения (рис. 5а) и графическим изображением в описании (рис. 3). Профилирование по винтовой линии с углом поворота 180° было произведено путем холодной обмотки стальной полосы вокруг цилиндра (рис. 5, б). Для указанного отвода шаг винтовой линии составлял расстояние между центрами его торцов.

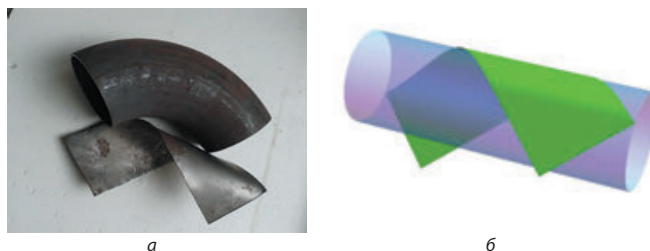


Рис. 5 Детали заводского опытного образца отвода: а – заготовки изделия; б – схема профилирования лопатки

Опытный отвод был установлен в дренажном трубопроводе обвязки блока сепараторов в режиме продувки на свечу на полном перепаде давления ($\sim 7,0$ МПа). Рабочая среда: природный газ, жидкость (пластовая минерализованная вода), абразивные частицы (до 50% по объему). Опытный отвод эксплуатационниками был врезан в трубопровод без требуемого изобретением увеличения диаметра номинального прохода, а значит, оценивалось влияние только лопатки.

Полученный результат испытаний (рис. 4) свидетельствует об отсутствии предполагаемого в описании влияния такой лопатки на снижение потерь энергии потока за счет ослабления известных [10] агрессивных отрывных явлений в зоне внутренней криволинейной поверхности центральной (большого радиуса) части отвода. Фактически эта лопатка образовала

в этой зоне отвода укороченный цилиндрический стальной желоб (рис.5, б), расположенный с любого конца отвода под углом 45° к вектору скорости загрязненного потока рабочей среды. Другими словами, получилась дополнительная стальная цилиндрическая стенка, загораживающая опасную зону возникновения свища в безлопаточном отводе. А из теории абразивной эрозии конструкционных материалов определенно следует, что углы атаки воздействующего загрязненного потока в диапазоне 30°-60° для стальных поверхностей соответствуют максимальной скорости изнашивания. Всё это говорит о некорректности формулы рассматриваемого изобретения [9] в части рассмотренного выше предпочтительного варианта. Отсюда и простейшая технология изготовления лопатки оказалась несостоятельной.

Правильная с точки зрения функции геометрия лопатки была сформулирована автором предпочтительного варианта формулы изобретения [9] в более поздней публикации [7], где указывалось, что лопатка имела вид разомкнутой ленты Мёбиуса. В этом направлении и было проведено представленное теоретическое исследование, суть которого сводится к обоснованию технологии изготовления такой лопатки.

Аналитически такая криволинейная поверхность лопатки описывается следующим образом. В трехмерном пространстве с декартовыми координатами x, y, z (рис. 6, а) в горизонтальной плоскости $z = 0$ проведена окружность C радиуса $R > 0$ с центром в начале координат O . Часть L окружности C , состоящая из точек с неотрицательными координатами x, y , задается формулами

$$x = R \cos t, y = R \sin t, z = 0, 0 \leq t \leq \pi/2. \quad (1)$$

Пусть Π – вертикальная плоскость, проходящая через ось z и точку P дуги L . Введем в плоскости Π декартову систему координат u, z с началом в точке O , где ось u определяется вектором (\vec{OP}) . В плоскости Π проведем отрезок I длины $2r$, где $0 < r < R$, так, что:

точка P является серединой отрезка I ;

если точка P лежит на оси x , то отрезок I лежит в плоскости $z = 0$;

при равномерном вращении точки P вокруг точки O по направлению от оси x к оси y отрезок I вращается вокруг точки P по направлению от оси z к оси u с вдвое большей угловой скоростью (на рис. 6, а изображены две кривые, образованные концами отрезка I при его движении в пространстве).

Отрезок I , проходящий через точку $P = (R \cos t, R \sin t, 0)$, задается формулами:

$$u = s \cos t, z = -s \sin 2t, -r \leq s \leq r. \quad (2)$$

Поэтому объединение S отрезков I по всем точкам P дуги L является параметризованной поверхностью

$$x = (R + s \cos 2t) \cos t, y = (R + s \cos 2t) \sin t, z = -s \sin 2t, \quad (3)$$

$$0 \leq t \leq \frac{\pi}{2}, -r \leq s \leq r.$$

Она и есть поверхность требуемого варианта исполнения лопатки.

Легко видеть, что поверхность S может быть задана неявно уравнением

$$2xy(R - \sqrt{x^2 + y^2}) - (x^2 - y^2)z = 0. \quad (4)$$

Это уравнение задает в пространстве алгебраическую поверхность 6-й степени. Поскольку градиент функции

$$f(x, y, z) = 2xy(R - \sqrt{x^2 + y^2}) - (x^2 - y^2)z \quad (5)$$

определен и не равен нулю во всех точках (x, y, z) , не лежащих на оси z , то S – гладкая поверхность.

Гауссова кривизна поверхности S вычисляется по формуле

$$K = \frac{4R^2}{(R + s \cos 2t)^2 + 4s^2} \quad (6)$$

Она отрицательна всюду, причем ее абсолютная величина отделена от нуля:

$$|K| \geq \frac{4R^2}{(R+r)^2 + 4r^2} \quad (7)$$

Поверхность S лежит внутри тора, образованного окружностями радиуса r , имеющими центр на окружности C и лежащими в вертикальных плоскостях, проходящих через ось z . Часть T этого тора, состоящая из точек с неотрицательными координатами x, y , задается формулами

$$x = (R + r \cos \varphi) \cos t, y = (R + r \cos \varphi) \sin t, z = r \sin \varphi, \quad (8)$$

$$0 \leq t \leq \frac{\pi}{2}, 0 \leq \varphi \leq 2\pi.$$

Края

$$x = (R \pm r \cos 2t) \cos t, y = (R \pm r \cos 2t) \sin t, z = \mp r \sin 2t, \quad (9)$$

$$0 \leq t \leq \frac{\pi}{2}$$

поверхности S принадлежат поверхности T , т.е. лопатка S вписана в крутоизогнутый отвод T (рис. 6, б, в).

Такую поверхность получить простым изгибанием, как это реализовано в заводском варианте исполнения (рис. 5), не представляется возможным, что подтверждается методами дифференциальной геометрии. Действительно, изгибанием гладкой поверхности называется такая ее деформация, при которой не меняются длины лежащих на поверхности кривых. Гауссова кривизна поверхности не меняется при изгибании. Гауссова кривизна плоскости (а также цилиндрической и конической поверхностей) равна нулю. Следовательно, поверхность отрицательной гауссовой кривизны не может быть получена изгибанием плоской стальной полосы.

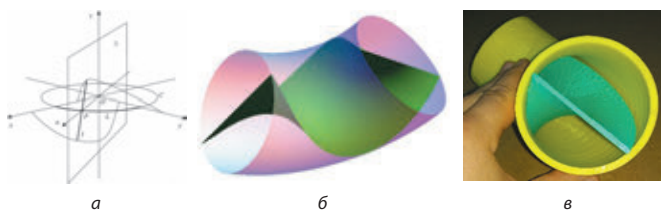


Рис. 6. Теоретическое представление износостойкого отвода: а – расчетная модель лопатки; б – графическая интерпретация; в – 3D образец

На практике деталь, имеющая форму поверхности S , не может быть изготовлена из плоской пластины без существенного растяжения материала. Причем растяжение действительно должно быть значительным, поскольку абсолютная величина гауссовой кривизны поверхности S отделена от нуля, что хорошо видно из формулы (7).

Наличие данного обоснования существенно облегчает задачу выбора технологии изготовления лопатки. Такие распространенные технологические методы формообразования, как литье и штамповка, для данной стальной лопатки в эконо-

мическом отношении являются не самыми предпочтительными. В простейшем экономически выгодном технологическом варианте стальная полоса-заготовка может быть подвергнута требуемой сложной деформации только методом холодной или горячей прокатки. Создание специальной технологической оснастки позволит обеспечить одновременно деформационные процессы гибки и закрутки стальной полосы [11].

Безусловно, при конструировании крутоизогнутого отвода с лопаткой ее материальное исполнение связано со способом крепления ее в отводе. Для стальной лопатки с разного рода износостойкими покрытиями на рабочих поверхностях ее позиционирование в отводе и последующее крепление сомнений не вызывает. При ширине части лопатки внутри отвода менее его диаметра условного прохода входная и выходная кромки лопатки выполняются равной ширины с диаметром отвода и используются для крепления лопатки сваркой. Применение же современных высокопрочных эрозионно-коррозионностойких неметаллических материалов для изготовления лопатки (например, углепластиков) потребует от конструкторов и технологов более тщательной проработки как способа формообразования, так и технического решения ее крепления.

Лопатка такой геометрии в некотором приближении сравнима с известным в аэродинамике завихрителем аксиально-тангенциального типа [12], организующим, в частности, слабо закрученную струю. Для таких струй характерна неравномерность распределения аксиальной составляющей скорости, т.е. с максимумом на оси. Именно такая характеристика несущего потока наряду с эжектирующим эффектом и стабилизацией турбулентности и позволит обеспечить требуемое воздействие на газодинамическую ситуацию вблизи изнашиваемой поверхности отвода. Причем помимо стабилизации турбулентности несущего потока наличие частиц мехпримесей в потоке приводит к существенной диссипации турбулентности несущей фазы, особенно в непосредственной близости от обтекаемой преграды [13]. За счет закрутки потока возможно снижение или даже устранение местных агрессивных отрывных явлений и парных вихрей в опасной зоне, известных в безлопаточном отводе [10].

Кроме того, скорости летящих в закрученном несущем потоке природного газа и скользящих по поверхности такой лопатки частиц механических примесей характеризуются тремя составляющими – радиальной, аксиальной и тангенциальной. А это является значимой причиной эффективного в данном случае нарушения их сосредоточенного воздействия на опасный участок внутренней поверхности отвода, т.е. рассеяния частиц по всей поверхности. При отмеченных преимуществах исследованной поверхности лопатки прочие преимущества изобретения [9] должны быть сохранены.

Учитывая, что задача о движении турбулентного потока в крутоизогнутом отводе трубопровода до сих пор теоретически не решена [10], эффективность изложенного технического решения может быть доказана лишь практически. Моделирование потока в модернизированном отводе (рис. 7), выполненное с помощью программы ANSYS, в сравнении с безлопаточным отводом является еще одним предварительным доказательством ожидаемого эффекта.

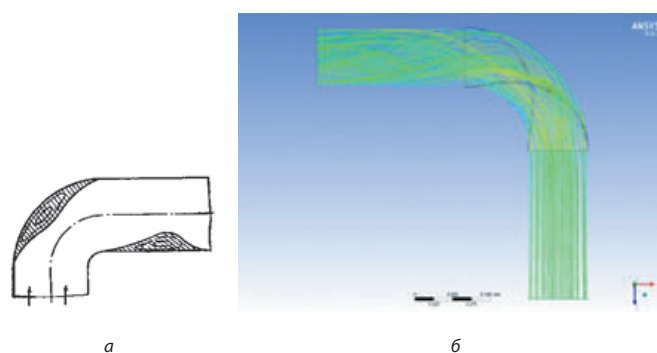


Рис. 7. Схема зон завихрений в безлопаточном отводе (а) [14] и компьютерная модель потока в отводе со спецлопаткой (б)

Предложение авторов другому отечественному специализированному заводу взять на себя риск изготовления опытного образца модернизированного отвода по правильной, т.е. изначально известной [15], технологии изготовления лопатки было переадресовано специалисту научного технологического центра ПАО «Газпром» для обоснования целесообразности предложения. Аргументация последовавшего отказа свелась к малой стоимости отвода и простоте его замены в случае отказа, что свидетельствовало о явном недопонимании научным сотрудником важнейшего показателя конкурентоспособности современного нефтегазового оборудования (и не только) – качества продукции, в данном случае по показателю надежности.

Ведь рассматривая только экономическую составляющую эффективности повышения качества крутоизогнутых отводов, не относящихся к категории дорогостоящих изделий, но с учетом их массовости и далеко не единичных случаев их отказов особенно в загрязненных средах, можно отметить следующие, сопряженные с отказом, потери:

- утечки в окружающую среду (возможно, длительные) транспортируемой по трубопроводу среды;
- возможное возгорание утечек с утратой связанного с трубопроводом оборудования, нанесение ущерба экологии, обслуживающему персоналу и близлежащим населенным пунктам;
- участок трубопровода с отказавшим отводом необходимо перекрыть и сбросить давление, что повлечет за собой либо технологические изменения транспортировки продукта, либо простой трубопровода и нарушение нормального режима функционирования (в худшем случае простой) связанного с ним дорогостоящего оборудования;
- работа сварщика по замене отказавшего отвода на новый, т.е. проведение огневых работ с привлечением инспектора «ООО „Газпром газобезопасность“»;
- гидравлические испытания врезанного отвода перед вводом в эксплуатацию.

Простейший расчет суммарных потерь в стоимостном выражении, помноженных на количество отказов таких недорогих трубопроводных изделий, совершенно очевидно доказывает значимость повышения качества (надежности) данной трубопроводной продукции.

Обозначения

x, y, z – декартовы координаты трехмерного пространства;

C – окружность радиуса $R > 0$;

L – часть окружности C ;

Π – вертикальная плоскость, проходящая через ось z и точку P дуги L ;

u, z – декартова система координат в плоскости Π ;

I – отрезок длины $2r$ в плоскости Π ;

S – параметризованная поверхность;

K – гауссова кривизна поверхности S ;

T – часть тора, внутри которого лежит поверхность S .

Библиографические ссылки

1. Губанок И.И. и др. Система инструментального мониторинга промышленной безопасности технологических объектов. – Газовая промышленность, 2004, №9, с.92-93.
2. Трубопроводный транспорт нефти / С.М. Вайншток и др.; под ред. С.М. Вайнштока. Т.2. М.: ООО «Недра-Бизнес центр», 2004, 621 с.
3. Москва, 15 окт. 2013 г. INTERFAX.RU – Предварительной причиной разлива нефти на Харьягинском (Ненецкий автон. округ, Печора) месторождении стал износ внутрипромыслового трубопровода.
4. Москва. 15 июля 2017 г. INTERFAX.RU – На Талаканском месторождении в Якутии произошел выброс газа из скважины из-за повреждения оборудования для добычи нефти и газа.
5. Москва. 18 января 2018г. INTERFAX.RU – Под Саратовом вечером в четверг прорвало нефтепровод («Транснефть»), нефть загорелась, после чего огонь перекинулся на частные дома.
6. Регулирующее устройство. Паспорт К.РУ.05.91.10.00-0-01 ПС. – Волгоград, 1996, АО «Волгограднефтемаш», 11 с.
7. Карелин И.Н. Цель – экологическая безопасность элементов газонефтяных трубопроводов // Трубопроводная арматура и оборудование. 2005. №3. С. 75 – 77.
8. Карелин И.Н. Инновационный подход к проектированию трубопроводной арматуры для загрязненных сред. // Арматуростроение. 2017. №2. С.56-62.
9. Пат. 2118737 Рос. Федерация. Колено стального трубопровода.
10. Повх И.Л. Техническая гидромеханика. – Л.: Машиностроение, 1974. 504 с.

11. Пат. 2365456 Рос. Федерация. Способ изготовления профилированной детали и устройство для его осуществления.
12. Аэродинамика закрученной струи. Под ред. Р.Б. Ахмедова. М.: Энергия, 1977. 240 с.
13. Вараксин А.Ю. Турбулентные течения с твердыми частицами. М.: Физматлит, 2003. 192 с.
14. Повх И.Л. Аэродинамический эксперимент в машиностроении. Л., Машиностроение, 1974, 480 с.
15. Карелин И.Н. Расчет технологических параметров при изготовлении защитной лопатки стального трубопровода. // Химическое и нефтегазовое машиностроение, 2008, №6, с. 9-11.

Аннотация: В статье проанализирован опыт реализации изобретения износостойкого крутоизогнутого отвода газонефтяного трубопровода. Показана некорректность одного из предпочтительных вариантов формулы изобретения. Теоретически доказана связь технологии изготовления защитной лопатки внутри отвода с ее предполагаемой эффективностью в аспекте воздействия на газодинамическую ситуацию вблизи зоны образования свища в стенке безлопаточного отвода. Предложено специализированным предприятиям России изготовить опытный образец изделия по инновационной технологии.

Ключевые слова: трубопровод, крутоизогнутый отвод, газодинамическая ситуация, лопатка, гауссова кривизна, технология.

Сведения об авторах

Карелин Игорь Николаевич,
доктор технических наук, профессор,
Российский государственный университет
нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина.
Адрес для переписки:
Балтийская ул., 4-9, 125315, Москва, Россия
8 916 206 72 82
E-mail: karelin-in@mail.ru

Седых Вячеслав Дмитриевич,
доктор физико-математических наук, профессор,
Российский государственный университет нефти и газа
(НИУ) имени И.М. Губкина, кафедра высшей математики
119991, Москва, Ленинский проспект, д.65, к.1. Москва, Россия

Седых Лариса Владимировна,
доцент НИТУ «МИСиС», кафедра ИТО
Ленинский проспект, д. 4, 119991, г. Москва, Россия