

УДК 533; 539.3

ЧИСЛЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭРОЗИИ И ПРОЧНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ ГАЗОПРОВОДОВ

© 2015 г. **Рябов А.А.¹, Кудрявцев А.Ю.¹, Воронков О.В.¹,
Меньшиков С.Н.², Мельников И.В.², Харитонов А.Н.²,
Киселев М.Н.², Архипов Ю.А.²**

¹*Саровский инженерный центр, Нижегородская обл., Дивеевский район,
Сатис, Российская Федерация*

²*Газпром добыча Надым, Ямало-Ненецкий автономный округ,
Надым, Российская Федерация*

alex.ryabov@saec.ru

Поступила в редакцию 17.04.2015

Представлена методология численного моделирования эрозионных явлений в трубопроводной системе при протекании смеси газа, твердых частиц и пленок конденсата на стенках трубы. Моделирование эрозионных повреждений является актуальной темой для нефтегазовой промышленности, атомной энергетики, а также представляет большой научный интерес как сложная комплексная задача оценки прочности и ресурса трубопроводов. Решения прикладных задач строятся на основе вычислительных комплексов STAR-CCM+ и Abaqus. Используются встроенные в STAR-CCM+ физические модели лагранжевых частиц, жидких пленок и эрозионного износа. Показаны зависимости скорости эрозионного повреждения от размеров и концентрации твердых частиц, от толщины жидких пленок в особо опасных местах трубопроводов – на изгибах, в местах поворотов и расположения штуцеров. Результаты численных исследований качественно соответствуют расположению и формам эрозионных повреждений, наблюдаемых при эксплуатации реальных объектов.

Ключевые слова: численное моделирование, эрозия, твердые частицы, жидкие пленки.

Введение

Основные запасы углеводородов крупнейших газовых месторождений, разрабатываемых в настоящее время на севере Западной Сибири, принадлежат сеноманским залежам, имеющим слабосцементированные песчаные коллекторы. Для этих месторождений характерно наличие механических примесей в продукции скважин, особенно в период поздней стадии разработки.

Разрушение скелета пласта и вынос песка на устье скважины приводит к абразивному износу наземного оборудования и является одной из острых проблем эксплуатации скважин. На рис. 1 приведены данные по изменению числа m пескопроявляющих скважин месторождения «Медвежье» во время его эксплуатации. Как видно из рисунка, количество таких скважин с 1988 по 2010 год увеличилось более

чем в 3 раза. Из-за выноса механических примесей примерно половина действующего фонда скважин ограничена по добыче. По некоторым оценкам, потери добычи газа за счет ограничения дебита скважин вследствие пескопроявления достигают 10%. В связи с этим весьма актуальной научной и практической задачей является выработка надежного критерия допустимого дебита скважин, исключающего возникновение аварийных ситуаций разрушения устьевого оборудования скважин, обусловленного выносимым песком.

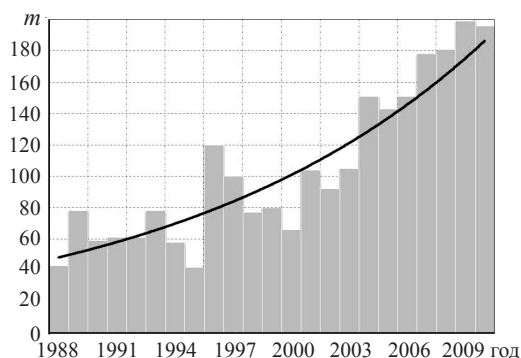


Рис. 1. Пескопроявления в скважинах месторождения «Медвежье»

На пескопроявляющих скважинах поток представляет собой гетерогенную смесь, включающую природный газ, капельную микродисперсную воду и мелкие частицы песка. При движении с большой скоростью на отдельных участках газотранспортных систем твердые частицы песка взаимодействуют со стенками элементов, вызывая в них локальный эрозионный износ. Развитие эрозии приводит к местным уменьшениям толщины стенок трубопроводов и запорно-регулирующих устройств. Магистраль находится под высоким давлением, поэтому локальное снижение толщины стенки снижает прочность элементов конструкции. С научной точки зрения рассматриваемая проблема представляет собой связную задачу газодинамики (движения гетерогенного газового потока с эффектами эрозионного износа стенок) и прочности – анализа напряженно-деформированного состояния локально ослабленных зон трубопроводных систем.

Целью настоящей статьи являются численные исследования газодинамических течений, эрозионных процессов и прочности элементов трубопроводных систем. Компьютерное моделирование проводится на основе лицензионных программных средств STAR-CCM+ и Abaqus с целью выработки обоснованного критерия допустимого дебита скважин в зависимости от концентрации песка.

1. Постановка задачи

Рассматривается изотермическая задача движения гетерогенной двухфазной (газо-песчаной, газо-водяной) смеси в деформируемых элементах газотранспортных систем. На основе анализа практической работы магистралей для численных исследований выбираются наиболее характерные элементы систем: поворотный участок и угловой штуцер. Рассматриваемый газ – метан.

На первом этапе изучается зависимость скорости эрозии от расхода газа и параметров газо-песчаной смеси при следующих данных: диаметр песчинок $d = 0,01; 0,10; 0,25$ мм; концентрация песка $N = 0,5; 2,0; 10,0; 40$ мм³/м³.

На втором этапе моделируется газо-водяная смесь с целью определения толщины образующейся на стенках трубы жидкой пленки при концентрации капель воды в газе 1–10 мм³/м³.

В заключение анализируется напряженно-деформированное состояние элемента системы под давлением газо-водяной смеси с локальным эрозийным износом.

Механика жидкости и газа. Движение многофазной подвижной среды описывается на основе законов сохранения энергии, импульса и массы, реализованных в уравнениях Навье – Стокса, осредненных по Рейнольдсу [1]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j) = S_m, \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j u_i - \tau_{ij}) = - \frac{\partial p}{\partial x_i} + S_i, \quad (2)$$

$$\frac{\partial (\rho h)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho h u_j + F_{h,j}) = \frac{\partial p}{\partial t} + u_j \frac{\partial p}{\partial x_j} + \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + S_h, \quad (3)$$

$$p = F(\rho, T), \quad (4)$$

$$h = H(c_p, T). \quad (5)$$

Здесь ρ – плотность; u – скорость; τ_{ij} – тензор турбулентных вязких напряжений; T – температура; $F_{h,j}$ – поток диффузной энергии; F – функция, связывающая давление, плотность и температуру (уравнение состояния); H – функция, связывающая энтальпию, удельную теплоемкость и температуру; S_m – источник массы; S_i – источник импульса в i -м направлении; S_h – источник энергии; $i = 1, 3$.

Для турбулентного потока осредненная по Рейнольдсу система (1)–(5) дополняется уравнениями для флуктуаций переменных (в зависимости от выбранной модели турбулентности), а тензор напряжений и поток диффузной энергии записываются в следующем виде:

$$\tau_{ij} = 2\mu s_{ij} - \frac{2}{3}\mu \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} - \overline{\rho u'_i u'_j}, \quad (6)$$

$$F_{h,j} = -k \frac{\partial T}{\partial x_j} + \overline{\rho u'_j h'}, \quad (7)$$

где u' – флуктуации относительно средней скорости, черта сверху означает процесс осреднения по ансамблю; μ – динамическая вязкость; $s_{ij} = \partial u_i / \partial x_j + \partial u_j / \partial x_i$; δ_{ij} – символ Кронекера; k – коэффициент теплопроводности. Третье слагаемое в правой части уравнения (6) отражает дополнительные рейнольдсовы напряжения, обусловленные турбулентной природой потока, а слагаемое, содержащее флуктуацию энтальпии h' в (7), представляет собой поток энергии турбулентного диффузионного течения.

Для описания движения твердых частиц используется многофазная модель Лагранжа [2], которая может включать в себя произвольное число дисперсных фаз. В рамках этой модели отдельные частицы объединяются в пакеты частиц, и их движение определяется взаимодействием со сплошной средой.

Уравнения сохранения импульса для материальной частицы записывается следующим образом:

$$m_p \frac{\partial v_p}{\partial t} = F_s + F_b. \quad (8)$$

Здесь m_p , v_p – масса и скорость частицы, F_s представляет собой силы, действующие на поверхность частицы (поверхностные), F_b – объемные силы (сила тяжести F_g в простейшем случае). Поверхностная сила, в свою очередь, раскладывается на составляющие:

$$F_s = F_d + F_p, \quad (9)$$

где F_d – сила сопротивления, F_p – сила градиента давления.

Скорость эрозии E_f определяется как масса материала стенки, подверженной эрозии, отнесенная к единице площади в единицу времени (кг/(м²·с)) [4, 5]:

$$E_f = \frac{1}{A_f} \sum_{\pi} m_{\pi} e_r, \quad (10)$$

где A_f – площадь поверхности, m_{π} – поток массы частицы π , соударяющейся с поверхностью стенки, e_r – коэффициент эрозии. Суммирование проводится по всем частицам, которые соударяются с поверхностью за единицу времени. Для коэффициента эрозии выбирается корреляция Ока [4]:

$$e_r = e_{90} g(\alpha) \left(\frac{u_p}{u_{ref}} \right)^{k_2} \left(\frac{D_p}{D_{ref}} \right)^{k_3}, \quad (11)$$

здесь u_{ref} и D_{ref} – характеристические параметры скорости и диаметра, которые определяются для конкретных материалов и условий задачи, k_2 и k_3 – константы, u_p и D_p – скорость соударения частицы с поверхностью стенки и ее диаметр, $g(\alpha)$ – функция угла падения, e_{90} – коэффициент эрозии при соударении под углом 90°.

Из-за присутствия в потоке капельной микродисперсной влаги на внутренних стенках каналов могут образовываться водяные пленки [6]. Эту особенность также необходимо моделировать. Основные допущения, принимаемые при моделировании жидкой пленки:

- толщина пленки достаточно мала для описания ламинарного пристеночного слоя;
- поперек пленки сохраняется параболический характер профиля скорости;
- поток нестационарный.

Используя данные допущения, уравнение закона сохранения записываем для каждого элемента расчетной сетки по жидкой пленке. Профиль скорости поперек пленки вычисляется следующим образом:

$$v(\xi) = v_w + \left(3 \frac{\bar{v}_f - v_w}{h_f} - \frac{\tau_{fs}}{2\mu} \right) \xi - \left(3 \frac{\bar{v}_f - v_w}{2h_f^2} - \frac{3\tau_{fs}}{4\mu h_f} \right) \xi^2, \quad (12)$$

где v_w – пристеночная скорость, \bar{v}_f – средняя скорость пленки, τ_{fs} – тензор натяжения свободной поверхности пленки, ξ – локальная координата по нормали к поверхности, h_f – толщина жидкой пленки.

Механика деформируемого твердого тела. Основное уравнение механики деформируемого твердого тела, выражающее закон сохранения энергии, можно представить в обобщенном интегральном виде [7]:

$$\iiint_V (\sigma_{ij} \delta \varepsilon_{ij} + \rho i \delta u) dV = \iiint_V \bar{F} \delta u dv + \iint_S \bar{p} \delta u, \quad (13)$$

где члены в левой части уравнения выражают потенциальную и кинетическую составляющие механической энергии, а члены в правой части отражают работу объемных сил F и поверхностных сил p на возможных перемещениях системы δu . Уравнение (13) дополняется кинематическими соотношениями, связывающими приращения деформаций $d\varepsilon_{ij}$ и перемещений du_i , которые строятся на основе модифицированного тензора приращений деформаций Грина [8], определенного в текущей метрике:

$$de_{ij} = d\varepsilon_{ij} - d\eta_{ij}, \quad d\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2}(du_{i,j} + du_{j,i}), \quad d\eta_{ij} = \frac{1}{2}du_{k,i}du_{k,j}. \quad (14)$$

Уравнения состояния, связывающие приращения напряжений $d\sigma_{ij}$ и деформаций $d\varepsilon_{ij}$, можно записать на основе общих соотношений А.А. Ильюшина для траекторий малой кривизны [9], которые приводятся к матричному виду [10]:

$$d\sigma = [B(P, N)]d\varepsilon. \quad (15)$$

Задавая материальные функции P и N , определяющие элементы матрицы $[B]$, можно получить соотношения деформационной теории пластичности [11]

$$N = \frac{2}{3} \frac{\sigma_i}{\varepsilon_i}, \quad P = \frac{2}{3} \frac{d\sigma_i}{d\varepsilon_i}$$

и теории течения [12]

$$N = 2G, \quad P = \frac{2}{3} \frac{d\sigma_i}{d\varepsilon_i}.$$

При упругих деформациях $N = P = 2G$, где G – модуль сдвига материала.

Методика численного моделирования. Для численного решения задачи механики подвижной среды используется пространственная дискретизация, реализованная в комплексе STAR-CCM+ на основе метода конечных объемов в сочетании с неявной схемой интегрирования по времени. Решение линеаризованной задачи на шаге интегрирования осуществляется итерационным многосеточным методом AMG с предобуславливателем. Сходимость итерационного процесса контролируется мониторингом норм невязок векторов решений системы линейных алгебраических уравнений и значений основных газодинамических величин в характерных точках.

Для численного решения задач разработан ряд компьютерных моделей движения газо-песчаной и газо-водяной смесей в рассматриваемых элементах трубопроводных систем с разрешением 16–20 пограничных слоев. Размерности дискретных моделей зависят от сложности формы моделируемого элемента и составляют от 200 до 700 тысяч гексагональных усеченных ячеек (рис. 2).

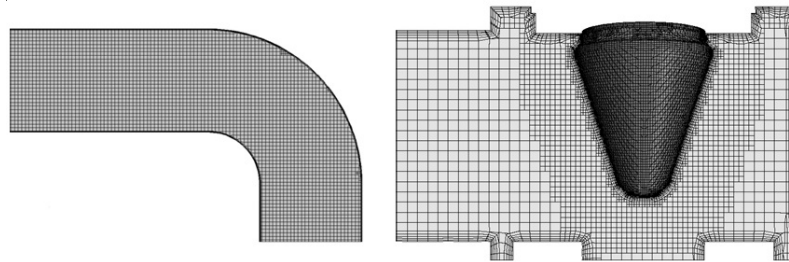


Рис. 2. Сечения сеточных моделей поворотного участка и штуцера

Численные расчеты напряженно-деформированного состояния элементов систем выполнялись на основе метода конечных элементов и лицензионных программных средств Abaqus, версия 6.13 [13]. Для решения задач прочности использовались 20-узловые конечные элементы C3D20R. Характерный масштаб пространственной дискретизации в локальной зоне максимального эрозионного износа составлял $\sim 0,0025$ мм. В расчетах применялась неявная схема решения системы линейных уравнений в сочетании с методом Ньютона итеративного решения нелинейных задач.

2. Численные результаты и их анализ

Было проведено более 200 расчетов с различными параметрами, на основе которых выявлены очаги локальной эрозии в элементах трубопроводов, получены зависимости скорости эрозии от дебита, концентрации и размера песчинок, толщины водяной пленки.

Поворотный участок

Поворотный участок является распространенным элементом газотранспортных систем, который больше всего подвергается эрозионному износу. Рассмотрено влияние различных параметров газо-песчаной смеси (диаметр песчинок $d = 0,01-0,25$ мм, расход $Q = (50-300) \cdot 10^3$ м³/сутки и концентрация песчинок в газе $N = 0,5-40$ мм³/м³) на показатель эрозии $F = \int E_f A_f dS$ поворотного участка. Интегрирование проводится по всей поверхности трубопровода, E_f – скорость эрозии, A_f – площадь поверхности.

На рис. 3 показаны зависимости изменения показателя эрозии F от размера песчинок d при постоянной концентрации песка $N = 0,5$ мм³/м³. Из рисунка видно, что при постоянной концентрации песка показатель эрозии при низком расходе незначительно возрастает с увеличением размеров песчинок. При увеличении расхода в шесть раз показатель эрозии существенно возрастает с увеличением размеров песчинок.

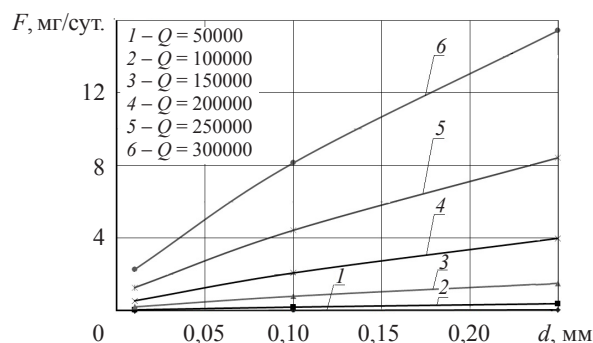


Рис. 3. Зависимость общего показателя эрозии от диаметра песчинок, $N = 0,5$ мм³/м³

На рис. 4 представлены зависимости показателя эрозии F от концентрации песка при постоянном размере песчинок $d = 0,01$ мм. Цифрами обозначены линии, соответствующие тем же расходам газа, что и на рис. 3. Видно, что во всем рассматриваемом диапазоне расходов при постоянном размере песчинок показатель эрозии линейно зависит от концентрации.

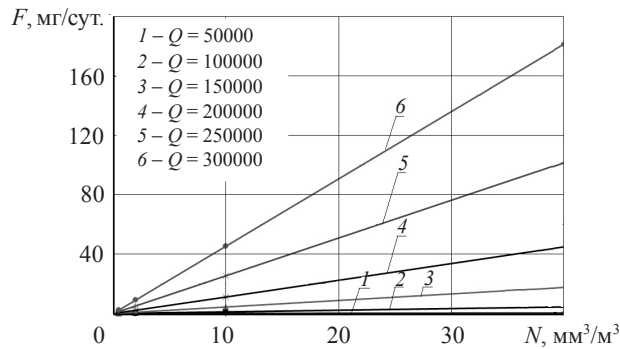


Рис. 4. Зависимость общего показателя эрозии от концентрации песка в газе, $d = 0,01$ мм

На рис. 5 приведены зависимости показателя эрозии от расхода газа при постоянном размере песчинок $d = 0,25$ мм и различных концентрациях песка. Видно, что при низкой концентрации песка $N \sim 0,5$ мм³/м³ эрозия слабо развивается во всем рассматриваемом диапазоне расходов. Однако при увеличении концентрации до уровня $N \sim 40,0$ мм³/м³ показатель эрозии существенно и нелинейно возрастает с ростом расхода.

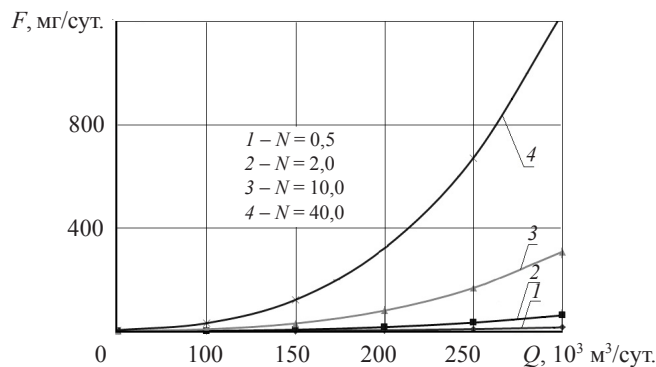


Рис. 5. Зависимость общего показателя эрозии от расхода газа, $d = 0,25$ мм

Как показывают расчеты, зависимость показателя эрозии от скорости песчинок и их диаметра полностью определяется степенями k_2 и k_3 в формуле (11). Таким образом, наиболее сильно показатель эрозии зависит от скоростей песчинок, которые, в свою очередь, определяются скоростью газа. Поскольку концентрация и диаметр песчинок – факторы, которые зависят от конкретной скважины и условий ее эксплуатации и могут быть непостоянными во времени, то расход газа является единственным параметром, изменением которого можно влиять на показатели эрозии.

Угловой штуцер

Газо-песчаная смесь. Проанализируем локальные зоны эрозии в угловом штуцере для расчетного режима: $P = 3,92$ МПа, $Q = 800000$ м³/сут., $N = 40,0$ мм³/м³, $d = 0,25$ мм. По результатам компьютерного моделирования углового штуцера можно выделить три наиболее подверженные эрозии области (рис. 6):

- игла (повреждение которой приводит к нарушению технологического режима работы скважины),
- стенка камеры за иглой (повреждение приводит к разгерметизации скважины)

и возникновению аварийной ситуации),

– седло (сужение в штуцере; повреждение приводит к нарушению технологического режима работы скважины).

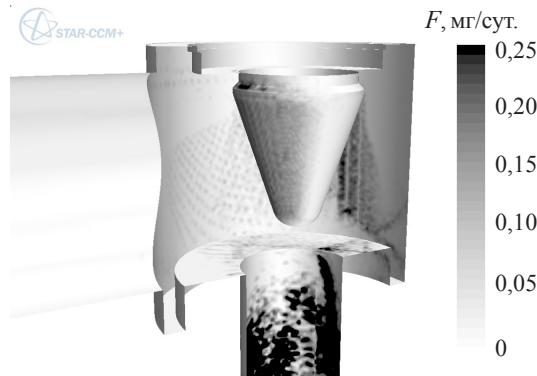


Рис. 6. Зоны эрозии в угловом штуцере

Необходимо отметить, что эти зоны образуются не для всех рассматриваемых режимов течения. Например, при потоке с частицами песка малого диаметра ($d = 0,01 \text{ мм}$) эрозии подвержены только область сужения в штуцере (седло) и в меньшей степени – игла. Результаты моделирования показывают, что расположение и размер областей повреждения материала не зависят от концентрации песка в газе, этот параметр влияет лишь на количественные характеристики скорости эрозии. Достоверность компьютерного моделирования зоны эрозионного износа в угловом штуцере подтверждается близостью ее расположения к эрозионному отверстию, возникающему на практике (рис. 7).

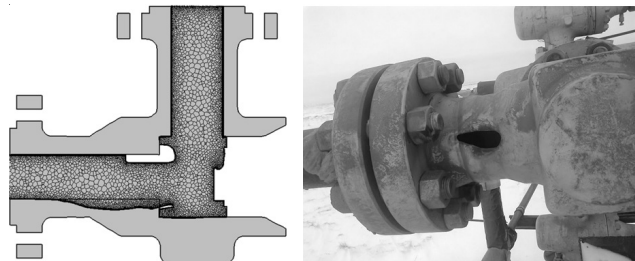


Рис. 7. Локализация эрозионного износа в угловом штуцере

Газо-водяная смесь. Так как в трубопроводной системе течет смесь газа, песка и воды, то капельки воды в отдельных зонах могут образовывать пленку на внутренней поверхности, которая является своеобразной защитой от песчинок. При этом необходимо получить ответы на два вопроса:

- насколько сильно водяная пленка может затормозить песчинки?
- совпадают ли в пространстве зоны образования водяных пленок и зоны эрозии?

Для ответа на первый вопрос проведены численные исследования девяти вариантов задачи для трех диаметров и трех скоростей движения частиц. На рис. 8 показано соударение песчинки с поверхностью водяной пленки в промежуточный момент времени.

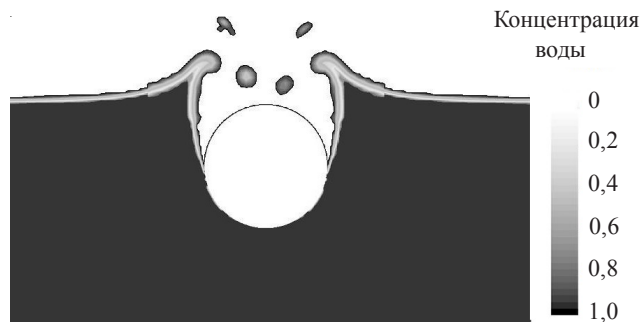


Рис. 8. Песчинка в водяной пленке на момент времени $t = 3,5$ мкс

Некоторые результаты исследований представлены на рис. 9 в виде зависимостей безразмерного параметра V/V_0 – падения скорости частицы от пройденного расстояния в жидкой пленке для частицы $d = 0,25$ мм (пройденное расстояние нормировано на размер частицы). Из рис. 9 видно, что скорость частицы при $V_0 = 5$ м/с снижается в 10 раз при прохождении расстояния $H \sim 16d$, а при $V_0 = 15$ м/с и выше – при $H \sim 22d$ и более, то есть частичка песка быстро тормозится в водяной пленке.

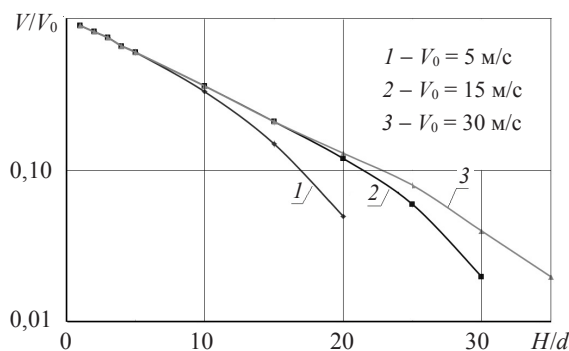


Рис. 9. Графики падения скорости в жидкой пленке в зависимости от пройденного расстояния

Расчеты показывают, что при максимальной начальной скорости $V_0 = 15$ м/с темп эрозии снижается в 100 раз для частицы диаметром $d = 0,01$ мм, если толщина пленки достигает $H = 0,15$ мм. Для частицы диаметром $d = 0,1$ мм толщина пленки должна составлять $H \sim 3$ мм, а для частицы $d = 0,25$ мм – $H \sim 9$ мм, что не реализуется на практике. Поэтому эффективно снижать скорость эрозии водяная пленка может только для мелких песчинок $d \sim 0,01$ мм.

Для ответа на второй вопрос проведена серия численных расчетов по моделированию образования водяной пленки. Результаты расчетов иллюстрируются также на примере углового штуцера. На рис. 10 показаны зоны образования водяной пленки на внутренней поверхности проточной части углового штуцера.

При сравнении рис. 6 и 10 видно, что зоны эрозии и места образования водяных пленок перекрываются. Толщина жидкой пленки в зоне эрозии на стенке и седле варьируется в пределах $H = 0,15$ – $0,25$ мм. Согласно расчетам, такая пленка способна уменьшить скорость эрозии для частиц размером $d = 0,01$ мм более чем на 95% (возможно полное исключение фактора эрозии), для песчинок $d = 0,1$ мм – на 25–35%, для частиц размером $d = 0,25$ мм – на 10–20%.

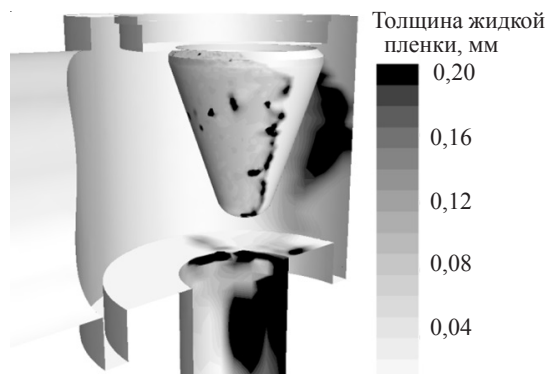


Рис. 10. Зоны образования жидкой пленки

На игле штуцера образуется пленка толщиной менее $H = 0,1$ мм (в среднем $\sim 0,05$ мм). На эрозию стенки трубопровода под действием крупных частиц ($d = 0,25$ мм) она влияет несущественно, поскольку их размер превышает толщину пленки более чем в два раза. Снижение скорости эрозии под воздействием частиц размером $d = 0,1$ мм составляет порядка 20%. Для самых мелких частиц ($d = 0,01$ мм) пленка такой толщины замедляет эрозию в 10 раз.

На завершающем этапе проведены расчеты напряженно-деформированного состояния рассматриваемого участка трубопровода, имеющего локальный эрозионный износ внутренней поверхности. Наиболее быстро предельный износ достигается в присоединительном фланце (рис. 11).

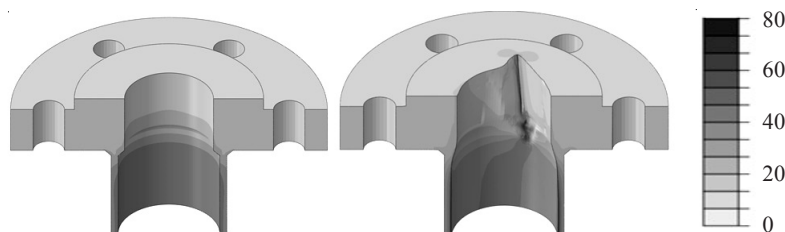


Рис. 11. Распределение интенсивности напряжений, МПа (исходное состояние – слева, с эрозионным износом – справа)

Измененная в результате моделирования эрозии в STAR-CCM+ внутренняя поверхность фланца с локальным утонением стенки передается в Abaqus для генерации конечно-элементной модели и расчета прочности, при этом форма внешней поверхности фланца соответствует исходной. К внутренней изношенной поверхности присоединительного фланца прикладывается равномерное избыточное давление $p = 3,92$ МПа.

Из рис. 11 видно, что в исходном, не подверженном эрозионному износу состоянии, фланец деформируется упруго, максимальная интенсивность напряжений не превышает $\sigma_{i, \max} = 34,3$ МПа, конструкция имеет достаточно высокий запас по пределу текучести: $\eta_T \sim 10$. В результате эрозионного износа толщина стенки фланца локально снижается до $h_{\min} \sim 0,5$ мм, при этом максимальная интенсивность напряжений возрастает до $\sigma_{i, \max} = 80,7$ МПа и запас прочности по пределу текучести снижается в 2,4 раза.

Выводы

По результатам численных исследований эрозионных процессов и прочности в двух характерных элементах газопроводов (поворотный участок и угловой штуцер) необходимо отметить следующее:

1. Достоверность компьютерного моделирования процессов эрозии на основе программных средств STAR-CCM+ и модели Ока подтверждается близостью расчетных зон локализации эрозионного износа и разрушениями реальных элементов при эксплуатации газопроводов. Разработанная технология позволяет не только определять зоны расположения эрозии, но и моделировать форму эрозионных каверн.

2. Выбранная модель Ока адекватно описывает показатели эрозии стали под действием частиц песка. В рамках этой модели наиболее значимым параметром, от которого зависит скорость эрозии, является скорость соударения частиц с объектом, которая напрямую зависит от расхода газа. Численными расчетами, в частности, установлено, что для постоянной концентрации песка скорость эрозии практически линейно зависит от диаметра частицы и существенно возрастает с ростом расхода газа.

3. Результаты расчетов показывают, что водяные пленки могут существенно уменьшить скорость утонения материала. Конкретная величина зависит от диаметра песчинки и ее скорости перед контактом с поверхностью воды. В некоторых случаях эрозия может быть полностью исключена. Например, наличие жидкой пленки толщиной $h = 0,15$ мм достаточно для полной нейтрализации песчинок $d = 0,01$ мм при их максимально возможной скорости в исследованных режимах.

4. Расчеты напряженно-деформированного состояния исходного и поврежденного эрозией фланца показывают, что при локальном утонении его стенки до $h_{\min} \sim 0,5$ мм запас прочности по пределу текучести снижается в 2,4 раза. Поэтому в расчетах долговременной прочности элементов газопроводов должен учитываться эрозионный износ внутренних поверхностей.

Список литературы

1. Лойцянский Л.Г. *Механика жидкости и газа*. М.: Дрофа, 2003. 840 с.
2. Rodi W. Experience with two-layer models combining the k-e model with a one-equation model near the wall. *29th Aerospace Sciences Meeting*, January 7–10, Reno, NV, AIAA 91-0216. 1991.
3. Crowe C.T., Sommerfeld M., Tsuji Y. *Multiphase flows with droplets and particles*. Boca Raton: CRC Press, 1998.
4. Oka Y.I., Okamura K., Yoshida T. Practical estimation of erosion damage caused by solid particle impact. Part 1: Effect of impact parameters on a predictive equation. *15th Int. Conf. on Wear of Materials. July–Aug. 2005*. San Diego, USA. 2005. Vol. 259. P. 95–101.
5. Oka Y.I., Yoshida T. Practical estimation of erosion damage caused by solid particle impact. Part 2: Mechanical properties of materials directly associated with erosion damage. *15th Int. Conf. on Wear of Materials. July–Aug. 2005*. San Diego, USA. 2005. Vol. 259. P. 102–109.
6. Bai C., Gosman A.D. Mathematical modeling of wall films formed by impinging sprays. *SAE Technical Paper Series 960626*. 1996.
7. Седов Л.И. *Механика сплошной среды*. М.: Наука, 1970. Т. 1. 492 с.; Т. 2. 568 с.
8. Васидзу К. *Вариационные методы в теории упругости и пластичности*. М.: Мир, 1987. 542 с.
9. Ильюшин А.А. *Пластичность. Основы общей математической теории*. М.: Изд-во АН СССР, 1963. 272 с.

10. Ильюшин А.А. *Пластичность*. М.: Гостехиздат, 1948. 376 с.
11. Столяров Н.Н., Рябов А.А. Упругопластическое выпучивание прямоугольных пластин. В кн.: *Прикладная теория упругости*. Саратов: СПИ, 1983. С. 27–36.
12. Малинин Н.Н. *Прикладная теория пластичности и ползучести*. М.: Машиностроение, 1975. 400 с.
13. Программный комплекс трехмерного моделирования процессов нестационарного нелинейного деформирования *Abaqus. Версия 6.13*. Dassault Systems Simulia Corp., Providence, RI, USA, 2013.

References

1. Loytsyanskiy L.G. *Mekhanika zhidkosti i gaza*. М.: Drofa, 2003. 840 s.
2. Rodi W. Experience with two-layer models combining the k- ϵ model with a one-equation model near the wall. *29th Aerospace Sciences Meeting*, January 7–10, Reno, NV, AIAA 91-0216. 1991.
3. Crowe C.T., Sommerfeld M., Tsuji Y. *Multiphase flows with droplets and particles*. Boca Raton: CRC Press, 1998.
4. Oka Y.I., Okamura K., Yoshida T. Practical estimation of erosion damage caused by solid particle impact. Part 1: Effect of impact parameters on a predictive equation. *15th Int. Conf. on Wear of Materials. July–Aug. 2005*. San Diego, USA. 2005. Vol. 259. P. 95–101.
5. Oka Y.I., Yoshida T. Practical estimation of erosion damage caused by solid particle impact. Part 2: Mechanical properties of materials directly associated with erosion damage. *15th Int. Conf. on Wear of Materials. July–Aug. 2005*. San Diego, USA. 2005. Vol. 259. P. 102–109.
6. Bai C., Gosman A.D. Mathematical modeling of wall films formed by impinging sprays. *SAE Technical Paper Series 960626*. 1996.
7. Sedov L.I. *Mekhanika sploshnoy sredy*. М.: Nauka, 1970. Т. 1. 492 с.; Т. 2. 568 с.
8. Vasilidze K. *Variatsionnye metody v teorii uprugosti i plastichnosti*. М.: Mir, 1987. 542 с.
9. Ильюшин А.А. *Пластичность. Основы обшей математической теории*. М.: Изд-во АН СССР, 1963. 272 с.
10. Ильюшин А.А. *Пластичность*. М.: Гостехиздат, 1948. 376 с.
11. Столяров Н.Н., Рябов А.А. Упругопластическое выпучивание прямоугольных пластин. В кн.: *Прикладная теория упругости*. Саратов: СПИ, 1983. С.27–36.
12. Малинин Н.Н. *Прикладная теория пластичности и ползучести*. М.: Машиностроение, 1975. 400 с.
13. Программный комплекс трехмерного моделирования процессов нестационарного нелинейного деформирования *Abaqus. Версия 6.13*. Dassault Systems Simulia Corp., Providence, RI, USA, 2013.

NUMERICALLY INVESTIGATING EROSION AND STRENGTH OF STRUCTURAL ELEMENTS OF GAS PIPELINES

**Ryabov A.A.¹, Kudryavtsev A.Yu.¹, Voronkov O.V.¹, Menshikov S.N.²,
Melnikov I.V.², Haritonov A.N.², Kiselev M.N.², Arkhipov Yu.A.²**

¹*Sarov Engineering Center, Nizhny Novgorod region, Diveevo district,
Satis, Russian Federation*

²*Gazprom Dobycha Nadym, Yamal-Nenets Autonomous Okrug,
Nadym, Russian Federation*

A methodology for numerical simulation of erosion phenomena in the piping system flows in gas mixtures, and solids particles and fluid film on the pipe walls is presented in this paper. Simulation of erosion damage is a hot topic for the oil and gas, nuclear industry, as well as of great scientific interest as complex problems for assessing the strength of pipelines. Solutions are built on the basis STAR-CCM + and Abaqus codes. Use built-in STAR-CCM + physical model Lagrangian

particles, liquid films and erosive wear. It is shown the dependence of the rate of erosion damage on the size and concentration of solid particles from the thickness of liquid films in high-risk areas of pipelines – on bends, turns and in places of location of fittings. The results of numerical studies are in good agreement with the position and shape of erosive caverns observed in the operation of real objects.

Keywords: numerical simulation, erosion, solid particles, liquid films.