

Благодаря высокой теплопроводности водорода увеличивается длина высокотемпературной части факела, что дает возможность повысить температуру порошка за счет некоторого удаления плазматрона от обрабатываемого изделия. Однако скорость плазменной струи с удалением от среза сопла понижается. Поэтому следует выдерживать оптимальное расстояние от среза сопла до поверхности изделия, величина которого зависит от параметров режима напыления, от материала покрытия и изделия и изменяется от 4 до 20 мм. Мощность плазматрона, используемого для напыления, можно повысить также при увеличении длины досоплового и внутрисоплового участков столба дуги, однако при чрезмерном увеличении внутрисоплового участка столба дуги затрудняется возбуждение дуги, обычно производимое с помощью высокочастотного пробоя. Увеличение длины канала сопла свыше определенного предела приводит к явлению шунтирования столба дуги и снижению к.п.д. плазматрона. Обычно в плазматронах для напыления диаметр сопла составляет 5-6 мм, длина досоплового участка – 4-8 мм, а длина канала сопла – 10-18 мм. Повышение мощности плазматрона за счет увеличения тока дуги ограничивается стойкостью сопла (анода). При эрозии сопла появляется не только опасность его разрушения, но и возможность загрязнения напыляемого материала, что может резко ухудшить качество покрытия. В плазматронах для напыления вращение анодного пятна по внутренней стенке сопла создается либо с помощью вихревой системы ввода рабочего газа, либо с помощью магнитного поля, образуемого катушкой постоянного тока, надетой на сопло. При использовании водорода в качестве рабочего газа с целью уменьшения величины теплового потока, направленного от дуги к соплу, водород применяют в смеси с аргоном, обеспечивающим тепловую изоляцию сопла от столба дуги.

Обычно в плазматронах для напыления ток не превышает 400 а, напряжение при использовании азота и смеси водорода с аргоном в зависимости от их расхода изменяется в пределах 60-100 в. Таким образом, мощность не превышает 40 квт. При этом производительность процесса напыления в зависимости от материала покрытия составляет 2-3 кг/ч. Качество обработки поверхности при плазменном напылении определяется максимальной прочностью сцепления материала покрытия с изделием и минимальной пористостью покрытия. Высокое качество покрытий обеспечивается при соответствии физических свойств материалов, например, в случае близости значений их коэффициентов теплового расширения. Повышение качества достигается при тщательной подготовке поверхности изделия перед процессом (обезжиривание, пескоструйная обработка, сушка и др.) и правильном выборе параметров режима напыления [7, 8, 9, 10, 11].

**Заключение.** Плазменная наплавка – инновационный метод нанесения на поверхность изношенных изделий специальных покрытий с высоким показателем износостойкости. Объясняется это тем, что возможно наплавления различных износостойких материалов (медь, латунь, пластмасса) на стальную деталь, относительно высокий КПД дуги (0,2 ...0,45), малое (по сравнению с другими видами наплавки) перемешивание наплавленного материала с основой, что позволяет достичь необходимых характеристик покрытий.

#### Литература

1. Мorigаки О., Хасуи А. Наплавка и напыление. – Москва: Машиностроение, 1985.
2. Сидоров А.И. Восстановление деталей машин напылением и наплавкой. – М.: Машиностроение, 1987. – 192 с.
3. Вайнерман А.Е., Шоршоров М.Х., Веселков В.Д., Новосадов В.С. Плазменная наплавка металлов – Л.: Машиностроение, 1969. – 192 с.
4. Карасев М.В., Клубникин В.С., Масленников В.М., Тополянский П.А. Способ плазменного напыления покрытий // Положительное решение на заявку № 4698232/26, кл. С 23 с 4/00, заявл. 31.03.89.
5. Пузряков А.Ф. Теоретические основы технологии плазменного напыления // учебное пособие, 2003.
6. Универсальная плазменная установка для напыления // Сварочное производство. 1984. – № 6. – С. 38-39.
7. Костиков В. И., Шестерин Ю. А. Плазменные покрытия. М.: Металлургия, 1978. – 160 с.
8. Сидоров А. И., Никитин А. С. Восстановление плазменной наплавкой коленчатых валов ЯМЗ-238НБ // Сварочное производство. – № 11, 1985.
9. Г.М. Русев, В.В. Овсянников, С.М. Киселев, Н.Ф. Галюк Технология восстановления и упрочнения наружные и внутренних поверхностей тел вращения и плоских поверхностей плазменным напылением // Автоматическая сварка. – 2000. – №12. – С.61-62
10. Быховский Р. Г. Плазменная обработка металлов на ленинградских предприятиях // Сварочное производство. – № 10, 1983. – 36 с.
11. Тополянский П.А. Высокоэффективные плазменные технологии нанесения покрытий // Технологии ремонта, восстановления, упрочнения и обновления машин, механизмов, оборудования и металлоконструкций. Материалы 4-й Всероссийской практической конференции 16-18 апреля 2002 г., Санкт-Петербург, 2002 – С. 50-55.

#### **К ВОПРОСУ О МОДЕЛИ ИСТЕЧЕНИЯ БОЛЬШИХ ОБЪЕМОВ ПРИРОДНОГО СЫРЬЯ ИХ ГАЗОПРОВОДА В РАМКАХ МЕТОДОВ ПОДОБИЯ**

**Льонг Ван Фо, Ву Конг Ханг**

Научный руководитель, профессор С. Н. Харламов

**Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия**

В настоящее время теория подобия и ее методы широко используется для обобщения экспериментальных данных и общего анализа физических явлений. С помощью этой теории физические величины можно объединять в безразмерные комплексы, представляющие отношения механизмов переноса между взаимодействующими переменными в рассматриваемых явлениях.

В основе теории подобия лежат три теоремы: в подобных явлениях одноименные числа подобия одинаковы; подобны только те явления, условия однозначности которых подобны;  $\pi$ -теорема, позволяющая решение дифференциальной задачи можно сформулировать в виде уравнения подобия.

Метод подобия работает с геометрическими подобными системам и физическими подобными явлениями. Так, геометрические системы отличаются деталями конфигураций рабочей области течения. При неизотермическом движении вязких сред имеют дело с частями тепловой и динамической задачи, характеризующих подобие в тепловых и гидродинамических процессах переноса тепла и импульса [1]. В таких задачах итогом решения выступают формулировки для интегральных параметров, коэффициента теплообмена (критерий Нуссельта) и перепада давления (гидравлического сопротивления со связью с критерием Эйлера). В частности, критерий Нуссельта является основным определяемым критерием подобия конвективного теплообмена, который характеризует отношение плотности теплового потока конвективной теплоотдачей к плотности теплового потока теплопроводности в слое текучей среды вблизи стенки [2]:

$$Nu = \frac{\alpha \cdot R_0}{\lambda};$$

где  $\alpha$ : коэффициент теплообмена;  $R_0$ : характерный линейный размер;  $\lambda$ : коэффициент теплопроводности.

К группе, определяемых критериев, характеризующих динамическую задачу, относят критерий Эйлера, представляющий перепад давления к динамическому напору [2]:  $Eu = \Delta p / (\rho \cdot w_0^2)$

При разработке математической модели истечения и выброса больших объемов (масс) жидкости из трубопровода имеют дело с уравнениями, представляющими закон сохранения: массы, импульса, энергии для однофазных или многофазных сред. В частности, уравнения конвективного теплообмена для простого случая движения несжимаемой химически инертной однофазной среды имеют вид:  $\frac{\partial T}{\partial \tau} + w \cdot \nabla T = a \cdot \nabla^2 T$  и

$$\frac{\partial \vec{w}}{\partial \tau} + w \cdot \nabla w = \vec{g} - \frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \cdot \nabla^2 w, \quad \text{что позволяет в рамках теории подобия сформулировать следующие:}$$

- Критерий Рейнольдса, характеризующий режим течения жидкости  $Re = (w_0 \cdot R_0) / \nu$  [2];
- Критерий Грасгофа, характеризующий подъемную силу, возникшую вследствие разности плотности жидкости  $Gr = \frac{g \cdot R_0^3}{\nu^2} \beta \cdot \Delta T$ . Здесь  $\beta$  - коэффициент объёмного расширения жидкости [2];
- Критерий Прандтля, определяющий физические свойства жидкости  $Pr = \nu / a$  [2];
- Критерий Пекле, характеризующий подобие между конвективным и диффузионным теплообменом:  $Pe = \frac{u \cdot R}{a}$  [2];
- Критерий Фурье, характеризующий соотношение между скоростью изменения тепловых условий в окружающей среде и скоростью перестройки поля температуры внутри тела:  $Fo = a \cdot \tau_0 / R_0^2$  [2];
- Критерий Стантона, характеризующий интенсивность диссипации энергии в потоке жидкости или газа:  $St = \frac{\alpha}{\rho \cdot c_p \cdot w_0}$  [2].

Опыт транспортировки углеводородных газов показал [3], что в газопроводах может накапливаться значительное количество жидкости, которая затем поступает в технологическое оборудование и возможно создают аварийные ситуации. Это подчёркивает, что в трубопроводах рабочая среда представляет собой многофазную систему. Тогда, образования структуры газожидкостного потока в зависимости от режимов течения газовой фазы представлены на рисунке 1: а – расслоенная плоская, в – расслоенная волновая; г, д – пробковая; е, ж – дисперсно-кольцевая; з – распределение дисперсной фазы и расслоенной жидкой фазы в пробковой структуре. Заметим, что любыми перечисленными расслоенными и пробковыми структурами в газовой фазе жидкость содержится в дисперсном состоянии.

Объем поступающей жидкости из диаметра зависит от длины, рельефа местности, параметров окружающей среды, состава перекачиваемого газа и особенностей технологий эксплуатируемых промыслов. По производственному опыту объем жидкости одновременно поступающей из газопровода диаметром от 500 мм может достигать 200 ÷ 500 м<sup>3</sup> [3]. Единичное поступление в емкостной аппарат большой массы жидкости осложняется ее высокой и непостоянной скоростью движения (рисунок 2). Скорость сплошной жидкости по трубопроводу составляет примерно 0,9 от скорости транспортируемого газа (20 ÷ 50 м/с) [3]. В процессе улавливания и отвода жидкости из газопровода ее движение становится ускоренным.

Описанный эффект неоднократно подтвержден экспериментально в лабораторных и производственных условиях. Нестационарный процесс течения жидкости из газопровода в емкость аппарата изображается системой уравнений, которые получают из следующих уравнений:

- уравнение И.В. Мещерского, отражающее движение тел переменной массы:

$$\frac{dW}{dt} = \frac{f \cdot (P_1 - P_2)}{M_L - t \cdot L_i};$$

- уравнение расхода жидкости через патрубок емкости:  $L_i = \rho_L \cdot f \cdot W_{Li}$ ;

где  $t$  – время поступления жидкости в емкость, с;  $f$  – площадь, занимаемая жидкостным потоком в самом узком поперечном сечении патрубка, через который поступает жидкость в емкость,  $m^2$ ;  $P_1, P_2$  – давление газовой фазы в трубопроводе за жидкостью и давление в емкости, Па;  $M$  – исходная масса жидкости, кг;  $\rho$  – плотность жидкости,  $kg/m^3$ ;  $W_{Li}$  – текущая величина скорости поступления жидкости через патрубок, м/с.

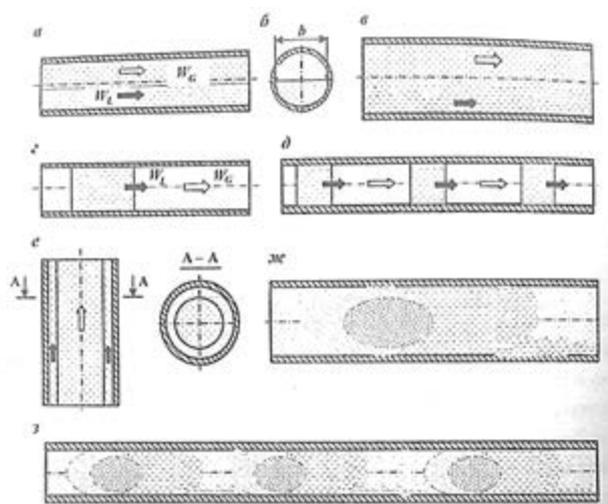


Рис. 1. Структуры потока при движении большой массы жидкости в газопроводе: а – расслоенная плоская; в – расслоенная волновая; з, д – пробковая; е, ж – дисперсно-кольцевая; ж, з – распределение дисперсной фазы и расслоенной жидкой фазы в пробковой структуре



Рис. 2. Изменение скорости жидкости при её поступлении в емкость: остаточная относительная масса жидкости в газопроводе  $M_L = M_{Li}/M_L$ ; относительная скорость поступления жидкости в емкость  $W_L = W_{Li}/W_L$ ; Где:  $M_{Li}$  – масса жидкости, которая остаётся в трубопроводе;  $M_L$  – исходная масса жидкости;  $W_{Li}$  – скорость жидкости, поступающей в ёмкость;  $W_L$  – начальная скорость жидкости, равная её скорости в трубопроводе. Рисунок из [3]

Возрастание скорости поступления жидкости в емкость графически представлено на рисунке 2, из которого видно [3], что скорость жидкости, поступающей в емкость, возрастает с уменьшением её массы в трубопроводе. Причем скорость остаточной жидкости “хвоста” увеличивается в 4÷ 4,8 раза от начальной величины скорости жидкости в газопроводе. На долю “хвостовой” части жидкости приходится 5÷ 20 % от общего объема. Динамический напор головной части жидкостной массы, поступающей из газопровода в емкость, рассчитывается по известной формуле:  $P_{LH} = 0,5 \cdot \rho_L \cdot W_L^2$ ; где  $W_{L1}$  – начальная скорость поступления жидкости в емкость (м/с):  $W_{L1} = 0,95 \cdot W_{G1}$ .

Скорость движения транспортируемого газа (м/с) равна:  $W_{G1} = \frac{G \cdot \rho_{G1}}{0,785 \cdot D_1^2}$ .

Здесь  $G$  – массовый расход транспортируемого газа, кг/с;  $D_1$  – диаметр трубопровода, по которому транспортируют газ, м;  $\rho_{G1}$  – плотность газа в трубопроводе,  $kg/m^3$ :  $\rho_{G1} = \frac{m \cdot P_1}{8314 \cdot T_1 \cdot z}$ ;  $P_1$  – давление газа в трубопроводе, Па;  $T_1$  – температура газа на входе в насадки, К;  $z$  – фактор сжимаемости.

Также, из графика 2 следует, что максимальная скорость хвостовой части жидкости равна:  $W_{L \max} = 4,8 \cdot W_L = 4,56 \cdot W_{G1}$ ;

Максимальный гидродинамический напор, выраженный через скорость транспортируемого газа по трубопроводу  $W_{G1}$ :  $P_{L \max} = 0,5 \cdot \rho_L \cdot (4,56 \cdot W_{G1})^2$ . Величина максимума гидродинамического напора при скоростях транспортируемого газа  $W_{G1} = 20$  м/с, составляет  $4,2 \cdot 10^6$  Па (4,2 МПа); при  $W_{G1} = 50$  м/с она равна  $2,6 \cdot 10^7$  Па.

Краткий анализ проблема показывает, что, с применением методов подобия, возможно построить математические модели процессов, выполнить анализ физических особенностей течения теплообмена и дать рекомендации в практику расчета структуры течения в трубопроводах. Последние важно при выборе методов интегрирования, определяющих управлений математической модели сложных технологических процессов в трубопроводах.

## Литература

1. Бухмиров В.В. Тепломассообмен: Учебное пособие / ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». –Иваново, 2014. – 360с.
2. Харламов С.Н. Математическое моделирование в задачах нефтегазовой отрасли. Конспект лекции, 2015.
3. Запорожец Е.П., Зазарченко Е.И. Математическое моделирование регулярных сбоя, подготовки и переработки нефтяных и природных газов: учебное пособие для студентов.- Краснодар: Издательский Дом-Юг, 2012. – 142 с.

**СРАВНЕНИЕ КАЧЕСТВА СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ДЕТАЛИ ИЗ ПРЕЦИЗИОННОГО СПЛАВА С ЗАДАНЫМИ ПАРАМЕТРАМИ УПРУГОСТИ, ПОЛУЧЕННЫХ ПРИ ПРИМЕНЕНИИ АРГОННО-ДУГОВОЙ И ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ ВЫСОКОТЕХНОЛОГИЧНЫХ СВАРОК**

**А. О. Мартынюк**

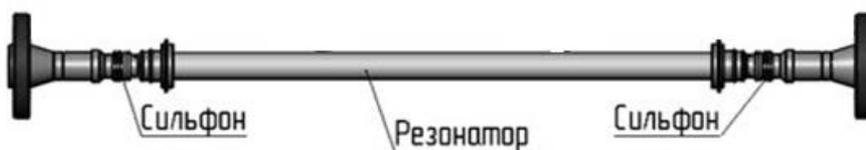
Научный руководитель, старший преподаватель В. А. Рудаченко  
*Национальный исследовательский томский политехнический университет, г. Томск, Россия*

Работа посвящена определению наиболее оптимального способа соединения чувствительного элемента вибрационного преобразователя вязкости и плотности. В ходе работ были определены два основных вида соединения, выполненные высокотехнологичной сваркой: аргонно-дуговая неплавящим электродом с присадкой, электронно-лучевая в вакууме. Применение данных видов соединения было использовано при использовании изделия при высоких давлениях и необходимостью обеспечения высокого коэффициента запаса прочности.

В данной статье представлены данные о результатах выполненных соединений с применением высокотехнологичной сварки.

Ключевые слова: резонатор, аргонно-дуговая сварка, электронно-лучевая сварка, пайка, 36НХТЮ.

По результатам разработки и изготовления опытного образца поточного преобразователя плотности и вязкости, и как следствие создание ключевого элемента - резонатора, который является основным во всей конструкции, была применена трубка цилиндрического сечения. Изготовлена трубка из прецизионного сплава марки 36НХТЮ с заданными параметрами упругости. Диаметр трубки составил 25 мм, а толщина стенки 1 мм. По средством сварки, резонатор соединяется с другими упругими элементами изделия. Через сильфоны, изготовленные из стали 38-6-0,21хб ГОСТ 55019-2015, трубка соединяется с переходными втулками и опорными кольцами [1, 2, 3], которые изготовлены из стали 12Х18Н10Т. Общий вид конструкции преобразователя плотности представлен на рис. 1.



*Рис. 1. Резонансная система*

Учитывая специфические свойства материала 36НХТЮ, конструктивные параметры трубки (тонкая толщина стенок), а также факт соединения деталей, изготовленных из сильно отличающихся между собой по свойствам материалов, серьезной задачей является определение оптимальной технологии сварки.

Для подтверждения химического состава сплава трубки из прецизионной стали 36НХТЮ был проведен ее химический лабораторный анализ. Результаты представлены в табл.1.

*Таблица 1*

*Химический состав сплава 36НХТЮ*

Марка сплава	Химический состав, %													
	Fe	Ni	Cr	Ti	Al	C	Si	Mn	Mo	S	P	Co	Cu	V
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>	<i>8</i>	<i>9</i>	<i>10</i>	<i>11</i>	<i>12</i>	<i>13</i>	<i>14</i>	<i>15</i>
36НХТЮ (данные лаборатории НИ ТПУ)	45,08	35	12,4	2,3	1,19	0,1	0,91	1,7	0,16	0	0	0,4	0,22	0,32
36НХТЮ (Сертификат завода)	45,93	36,08	12,53	2,74	1,14	0,03	0,46	1,07	0	0,01	0,013	0	0	0

Процесс опробования установил, что сплав марки 36НХТЮ, в независимости от вида присадок, имеет склонность к активному образованию трещин в теле трубы вдоль зоны сварного шва. Это говорит о