



На правах рукописи

Поляков Алексей Владимирович

**ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА УСТРОЙСТВ
ДЛЯ ПОДАЧИ РЕАГЕНТА В ТРУБОПРОВОД ПРИ ДАВЛЕНИИ
РЕАГЕНТА НИЖЕ ДАВЛЕНИЯ В ТРУБОПРОВОДЕ**

Специальности: 25.00.17 – Разработка и эксплуатация нефтяных
и газовых месторождений;

05.02.13 – Машины, агрегаты и процессы (нефтегазовая
отрасль)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

24 МАЙ 2012

Краснодар – 2012

Работа выполнена в ФГБОУ ВПО
«Кубанский государственный технологический университет»

Научные руководители: доктор технических наук, профессор
Кунина Полина Семеновна

кандидат технических наук
Бойко Сергей Иванович

Официальные оппоненты: **Гарушев Александр Рубенович**
доктор технических наук, профессор
кафедры нефтегазовых промыслов
ФГБОУ ВПО «Кубанский государственный
технологический университет»

Миненков Владимир Михайлович
кандидат технических наук
ООО НПК «Эксбур-К»,
генеральный директор

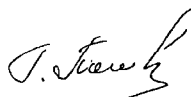
Ведущая организация: ООО НК «Роснефть – НТЦ», г. Краснодар

Защита состоится «30» мая 2012 года в 15⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета ДМ 212.100.08 при Кубанском государственном технологическом университете по адресу: 350020, г. Краснодар, ул. Красная, 135, ауд. 94

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Кубанского государственного технологического университета по адресу: 350072, г. Краснодар, ул. Московская, 2

Автореферат разослан «28» апреля 2012 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат химических наук, доцент



Г.Г. Попова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Одной из серьезных проблем при эксплуатации промысловых газопроводов, а также оборудования для подготовки газа к транспорту в зимнее время года, особенно в северных регионах, является гидратообразование. Известно, что образования гидратов приводит к значительному увеличению гидравлического сопротивления и снижению пропускной способности трубопроводов вплоть до полного закупоривания, что, в свою очередь, нередко способствует возникновению аварийных и опасных ситуаций. Поэтому периодически или постоянно необходимо вводить в трубопровод ингибитор (обычно метанол) для предотвращения образования гидратов и ликвидации гидратных пробок. Однако ввод ингибитора должен быть строго дозирован, т.к. его переизбыток может привести к заполнению нижней части трубопровода метанолом, что затрудняет его эксплуатацию вследствие образования уже метаноловых пробок. Кроме того, переизбыток метанола может привести к выходу из строя оборудования перекачки и регулирования потока газа и, особенно, контрольно-измерительных приборов. Поэтому задача оптимизации системы ввода ингибитора в промысловые газопроводы на сегодняшний день весьма актуальна.

Непосредственно само устройство для ввода ингибитора в трубопровод является последним, но весьма важным звеном довольно сложных систем впрыска ингибитора, и от эффективности его работы во многом зависит бесперебойная и безаварийная эксплуатация промысловых трубопроводов и технологического оборудования. На сегодняшний день существующие устройства для дозированного впрыска метанола обладают рядом недостатков, таких как: недостаточная контактная поверхность потока газа и вводимого ингибитора, передозировка, требования дополнительных энергозатрат, значительная металлоемкость оборудования.

Поэтому создание более надежного и эффективного устройства ввода ингибитора для предотвращения гидратообразования в промысловые газопроводы и технологическое оборудование подготовки газа к транспорту является весьма актуальной задачей.

Цель работы:

Совершенствование средств обеспечения безаварийной работы систем промыслового сбора и подготовки газа путем разработки эффективного эжекционного струйного аппарата для дозированного ввода метанола в промысловые газопроводы и технологическое оборудование с целью ликвидации и предотвращения возникновения гидратообразований.

Основные задачи исследования:

1. На основании анализа существующих принципов функционирования эжекционных струйных аппаратов выявить оптимальную компоновку и конструктивные размеры элементов этих устройств, предназначенных для

использования в системах дозированного впрыска метанола как непосредственно на промыслах, так и в составе установок подготовки газа.

2. Теоретически обосновать зависимость эффективности процесса эжекции от давления и скорости потока газа; поперечного сечения, конусности конфузора-диффузора и длины камеры смешения эжекционного аппарата.

3. Разработать экспериментальную лабораторную установку, моделирующую гидрогазодинамические условия в эжекционных струйных аппаратах.

4. На основании проведенных теоретических и экспериментальных исследований разработать конструкцию эжекционного струйного аппарата, обеспечивающего повышенную эффективность ввода ингибитора по сравнению с существующими традиционными методами.

5. Провести экспериментальные исследования эффективности работы разработанного устройства с целью подтверждения теоретически обоснованных зависимостей и сравнении его с существующими.

6. Разработать алгоритм расчета эжекционного устройства для дозированного впрыска метанола в промысловые газопроводы и технологическое оборудование УКПГ.

7. Разработать теоретические основы расчета распределения температур в газосборной сети и сопротивлений при подаче метанола и на их основе программного обеспечения для систем автоматической дозированной подачи метанола.

Научная новизна

1. На базе теоретических и экспериментальных исследований научно обоснованы гидрогазодинамические характеристики работы односопловых струйных эжекционных аппаратов для ввода ингибитора в промысловый газопровод.

2. Предложен способ ввода метанола в трубопровод с помощью эжекционных струйных аппаратов, в котором реализованы полученные экспериментальным путем данные по эффективности процесса захвате высоконапорной среды газа низконапорной средой метанола.

3. Разработаны теоретические основы расчета распределения температур в газосборной сети и сопротивлений при подаче метанола

Методы исследований

В исследованиях использовались методы планирования экспериментов, практические методы экспериментального исследования, методы системного анализа, математического моделирования процессов эжектирования, адекватно отражающий структуру эжекционной турбулентной струи и процессов эжектирования в исследуемом струйном аппарате, теоретические основы гидрогазодинамики течения флюидов и поисковые методы оптимального проектирования.

Личный вклад соискателя

Все экспериментальные работы, аналитические зависимости, вошедшие в диссертацию, их анализ и выводы получены и доказаны лично автором. В работах, опубликованных в соавторстве, автор принимал участие в постановке задачи исследования, получении и обработке теоретических и экспериментальных результатов, обобщении опытных данных и разработке программного обеспечения.

Практическая ценность работы

1. Внедрение в производство разработанного автором эжекционно-струйного аппарата позволит:

– решить проблему гидратообразования в промысловых газопроводах и на установках комплексной подготовки газа путем установки разработанного устройства ввода;

– повысить степень энергосбережения на промыслах, за счет снижения затрат на подачу ингибитора насосами дозаторами и использования энергии давления газа;

– снизить расход ингибитора благодаря высокой степени дисперсности вводимого ингибитора.

2. Разработанная методика расчета струйного аппарата может быть использована для систем эжекционного впрыска метанола как на вновь проектируемом, так и на уже эксплуатируемом промышленном газопроводе.

3. Доказано, что разработанный аппарат и способ ввода ингибитора в промысловый газопровод более эффективен по сравнению с традиционными методами, что подтверждается соответствующим заключением о внедрении.

4. Разработано программное обеспечение расчета распределения температур в газосборной сети и сопротивлений при подаче метанола для систем автоматической дозированной подачи метанола.

5. Издана монография (в соавторстве) «Проектирование газонефтепроводов» для студентов специалистов, бакалавров, магистров и аспирантов, обучающихся по направлению 131000 «Нефтегазовое дело».

Основные защищаемые положения

1. Методика расчета и конструирования эжекционных струйных аппаратов для дозированного ввода метанола в трубопровод.

2. Способ и устройство дозированного ввода ингибитора для борьбы с гидратообразованием в системах промышленного сбора и подготовки газа на промыслах.

3. Теоретические основы расчета распределения температур в газосборной сети и сопротивлений при подаче метанола

4. Программное обеспечение расчета распределения температур в газосборной сети и сопротивлений при подаче метанола для систем автоматической дозированной подачи метанола

Апробация результатов работы

Результаты диссертационной работы и ее основные положения докладывались и обсуждались на Международной научно-практической конференции «Сбор, подготовка и транспортировка углеводородов 2012» (г. Сочи, 2012 г.), научно-технической конференции молодых специалистов ООО «РН-Краснодарнефтегаз» (г. Краснодар – 2009, 2010 гг.), научно-технических советах ООО «Газпром – Трансгаз – Кубань» и научно-практических семинарах кафедр «Оборудования нефтяных и газовых промыслов», «Нефтегазового промысла» ФГБОУ ВПО «Кубанский государственный технологический университет» (2009–2011 гг.).

Публикации

Основное содержание диссертации отражено в 10 печатных работах, в том числе 5-ти статьях в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, 2 патентах на изобретение и 3-х патентах на полезные модели.

Объем и структура работы

Диссертационная работа изложена на 148 страницах машинописного текста, содержит 19 таблиц, 45 рисунков. Состоит из введения, четырех разделов, основных выводов и рекомендаций, списка использованных источников из 156 наименований и двух приложений.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, определены цели и задачи исследования, научная новизна и практическая значимость диссертационной работы, определены основные задачи исследований и защищаемые положения.

В первой главе рассмотрены состав и структура гидратов условия их образования и места наиболее вероятного их скопления. Приведены применяемые в промысловых условиях способы борьбы с образованием гидратов и методы их ликвидации.

На основании анализа достоинств и недостатков существующих систем ввода ингибитора в газопровод автором был предложен способ, дающий возможность строго дозировать ввод ингибитора в промысловый газопровод, причем непосредственный ввод ингибитора осуществляется через эжекторное устройство. Предлагаемый способ и устройство ввода ингибитора в трубопровод, по мнению автора, является более эффективным по сравнению с существующими способами, что достигается использованием в качестве устройства ввода ингибитора эжекционного струйного аппарата, который, благодаря высокой степени дисперсности газожидкостного потока на выходе, позволяет не только снизить расход ингибитора, но и значительно уменьшить затраты на электроэнергию, так как подача ингибитора осуществляется за счет энергии перекачиваемого газа. Кроме того, эжектор (рис. 2) обладает высокой надежностью за счет простоты конструкции, и потому не требует дополнительного обслуживания.

На рисунке 1 представлена принципиальная схема установки ввода ингибитора в промышленный газопровод.

Установка работает следующим образом. По магистральному газопроводу 2 газ подается под давлением на эжектор 1, под действием давления перекачиваемого газа в эжекторе 1 создается разрежение, благодаря которому происходит приток низконапорной жидкости из емкости 3 по линии подачи ингибитора 4 через регулирующий клапан 5 подается метанол в эжектор 1, далее в эжекторе 1 происходит смешивание газа и жидкости (ингибитора), причем метанол диспергируется, на выходе из эжектора 1 давления газожидкостной смеси восстанавливается. Клапаны регуляторы 5, 7 служат для регулирования подачи ингибитора и поддержания оптимального давления в емкости 3, а также для отключения установки.

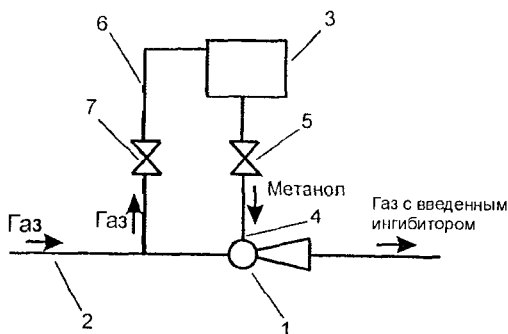


Рисунок 1 – Принципиальная схема установки ввода ингибитора в промышленный газопровод: 1 – эжектор; 2 – газопровод; 3 – емкость; 4 – линия подачи ингибитора; 5 – клапан регулирующий подачу ингибитора в трубопровод; 6 – уравнивательная линия; 7 – клапан регулятор уравнивательной линии

На рисунке 2 приведена принципиальная схема предлагаемого эжекторного струйного аппарата для впрыска метанола в газопровод.

Вследствие того, что принципы действия всех эжекторных струйных аппаратов основаны на использовании струйных течений, в первом разделе рассмотрены основные свойства, теоретические, эмпирические и полумпирические зависимости расчетов струйных течений газа.

В связи с этим, сочетая теоретические и экспериментальные способы исследования, в данной работе поставлены следующие задачи:

- разработка теории процесса в аппарате со струйными течениями жидкостей и газов;
- экспериментальная проверка основных положений разработанных моделей и их корректировка;
- разработка алгоритма расчета процесса и основных геометрических параметров эжекторного аппарата.

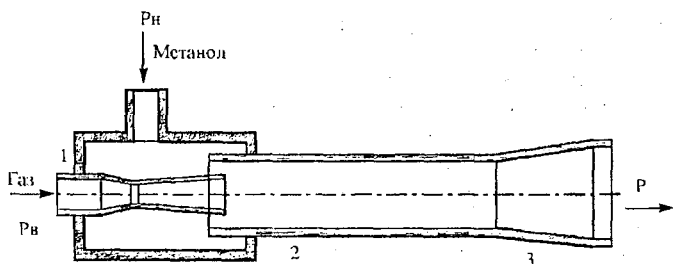


Рисунок 2 – Принципиальная схема эжекторного струйного аппарата:
1 – сопло; 2 – камера смешения; 2 – диффузор

Во второй главе предложен теоретический анализ процесса эжектирования низконапорной среды высоконапорной средой.

Принята следующая модель процесса эжектирования низконапорной среды высоконапорной средой для односоплового струйного аппарата. Высоконапорная среда отделяется от потенциального ядра струи (рис. 3), захватывает из окружающего струю пространства низконапорную среду и передает ей свою кинетическую энергию. Из полученной смеси образуется расширяющийся пограничный слой. Принимаем, что расширение пограничного слоя и сужение потенциального ядра струи происходит по линейному закону, а скорость низконапорной среды на входе в эжектор пренебрежимо мала по сравнению со скоростью высоконапорной среды. В переходном сечении 1-1 турбулентной струи смесь высоконапорной и низконапорной сред займет всю площадь этого сечения.

От переходного сечения 1-1 низконапорную среду из окружающего пространства захватывает та смесь, которая образовалась на начальном участке струи от сечения 0-0 до сечения 1-1. В результате захвата низконапорной среды из пространства смесью, отделившейся от потока, происходит дальнейшее расширение пограничного слоя, но, в то же время, происходит сужение от сечения 1-1 ядра потока, состоящего из смеси высоконапорной и низконапорной сред. Принимаем также, что расширение пограничного слоя и сужение ядра потока от сечения 1-1 вдоль по струе происходит по линейному закону. Аналогично происходит процесс эжектирования низконапорной среды из окружающего пространства на участке струи после сечения 2-2 и т.д.

Принимается выражение для расчета КПД процесса эжекции низконапорной среды в сечении X-X струйного течения в следующем вид:

$$\eta_{ст} = \frac{G_n \cdot \rho_n \cdot P_n \cdot \ln \frac{P_{ст}}{P_n}}{G_n \cdot \rho_n \cdot (P_n - P_{ст})} \quad (1)$$

где G_n – массовый расход низконапорной струи $\text{м}^3/\text{с}$; G_n – массовый расход высоконапорной струи $\text{м}^3/\text{с}$; ρ_n – плотность высоконапорной сре-

ды кг/м^3 ; $\rho_{н}$ – плотность низконапорной среды кг/м^3 ; $P_{н}$ – давление низконапорной струи Па; $P_{ст}$ – давление струи Па; $P_{в}$ – давление высоконапорной струи Па.

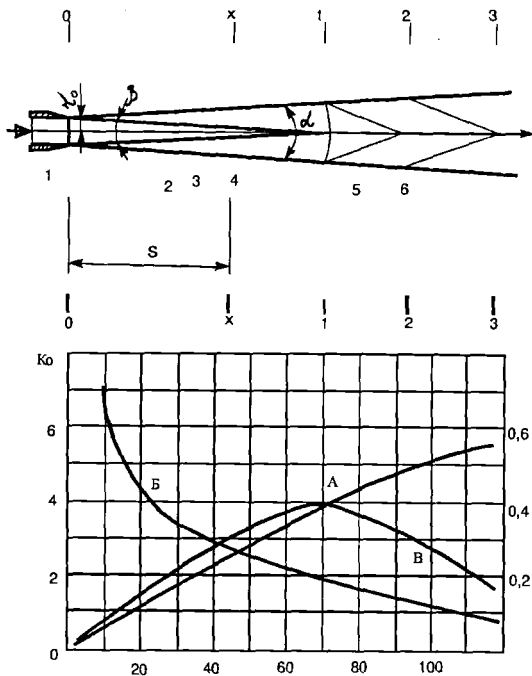


Рисунок 3 – Расчетная схема турбулентного струйного течения:
 1 – сопло; 2 – потенциальное ядро струи; 3 – пограничный слой струи; 4 – изотаха, ограничивающая потенциальное ядро струи; 5, 6 – изотакхи, ограничивающие ядра потока смеси на основном участке струи; А – кривая изменения коэффициента эжекции K_0 по длине струи; Б – кривая изменения коэффициента полного напора струи $\psi_{ст}$ по ее длине; В – кривая изменения КПД процесса эжекции по длине струи $\eta_{ст}$.
 при $\alpha/\beta=1,25$ и $P_в/P_{н}=20$

Количество отделившейся высоконапорной среды от потенциально-го ядра струи на участке от сечения 0–0 до сечения X–X выразим в виде уравнения:

$$G_B = V_{я} \cdot \rho_{в} \cdot f_B, \quad (2)$$

где f_B – площадь высоконапорной поверхность струи м^2 ;

$$V_{\text{я}} = \left[\frac{2k}{k-2} \cdot \frac{P_{\text{в}}}{\rho_{\text{в}}} \right]^{0.5} - \text{скорость ядра струи м/с,} \quad (3)$$

где k – коэффициент теплоемкости;

В уравнении (2) скорость ядра струи зависит от режима истечения высоконапорной среды из сопла и описывается уравнением (3), а величина $f_{\text{в}}$ является площадью, занятой в сечении X–X высоконапорной средой, отделившейся от потенциального ядра струи на рассматриваемом участке. Указанная площадь зависит от угла сужения β потенциального ядра струи, длины рассматриваемого участка и радиуса струи в сечении 0–0, который принимаем равным радиусу отверстия выхода сопла в сечении 0–0. Количество захваченной низконапорной среды $G_{\text{н}}$ на участке струи от сечения 0–0 до сечения X–X выразим в виде:

$$G_{\text{н}} = V_{\text{нс}} \cdot \rho_{\text{н}} \cdot f_{\text{н}}, \quad (4)$$

где $V_{\text{нс}}$ – скорость пограничного слоя струи м/с; $f_{\text{н}}$ – площадь низконапорной поверхности струи м².

Средняя скорость пограничного слоя находится из выражения:

$$V_{\text{нс}} = 0,5 \cdot V_{\text{я}} \frac{\rho_{\text{в}} \cdot f_{\text{в}}}{\rho_{\text{н}} \cdot f_{\text{н}}} \left[\left(1 + 4 \frac{\rho_{\text{в}} \cdot f_{\text{в}}}{\rho_{\text{н}} \cdot f_{\text{н}}} \right)^{0.5} - 1 \right]. \quad (5)$$

Среднюю скорость всей струи в сечении X–X примем в виде:

$$V_{\text{СТ}} = \frac{(G_{\text{н}} + G_{\text{в}}) \cdot V_{\text{нс}} + (G_{\text{в}} - G_{\text{в}}) \cdot V_{\text{я}}}{(G_{\text{н}} + G_{\text{в}})}. \quad (6)$$

Основываясь на том, что статическое давление в любой точке турбулентной струи равно статическому давлению окружающей ее низконапорной среды $P_{\text{н}}$, запишем выражение для полного напора струи $P_{\text{СТ}}$ в сечении X–X в виде:

$$P_{\text{СТ}} = (\rho_{\text{СТ}} \cdot V_{\text{СТ}}^2 / 2) + P_{\text{н}}, \quad (7)$$

где $\rho_{\text{СТ}}$ – плотность струи кг/м³;

В уравнении (7) плотность струи в сечении X–X запишем как отношение:

$$\rho_{\text{СТ}} = \frac{\rho_{\text{в}} \cdot \left(K_0 \cdot \frac{\rho_{\text{н}}}{\rho_{\text{в}}} + 1 \right)}{K_0 + 1}, \quad (8)$$

где $K_0 = \frac{G_{\text{н}} \cdot \rho_{\text{в}}}{G_{\text{в}} \cdot \rho_{\text{н}}}$ – объемный коэффициент эжекции в струйном течении.

Величина коэффициента эжекции K_0 увеличивается (рис. 3) при увеличении плотности высоконапорной среды $\rho_{\text{в}}$ по отношению к плотности низконапорной среды $\rho_{\text{н}}$. Коэффициент эжекции также увеличивается с увеличением угла расширения пограничного слоя α и уменьшением угла

сужения потенциального ядра струи \square . С увеличением плотности низконапорной среды ρ_H по отношению к плотности высоконапорной среды ρ_B величины КПД снижаются как показано на рисунке 4. Величины коэффициентов полезного действия $\eta_{СТ}$ процесса эжекции в струе уменьшаются с увеличением отношения давления высоконапорной среды P_B к давлению низконапорной среды P_H .

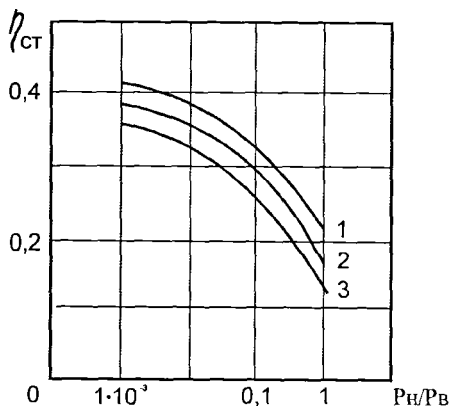


Рисунок 4 – Изменения величин КПД ($\eta_{СТ}$) процесса эжекции в переходном сечении I–I струи в зависимости от соотношения плотностей низконапорной и высоконапорной сред, ρ_H и ρ_B : 1, 2, 3 – изменения величин КПД ($\eta_{СТ}$) при давлениях $P_B/P_H = 10, 20; 30$; P_B – давление нагнетания высоконапорной среды в сопло; c – статическое давление низконапорной среды

Таким образом, из проведенного анализа следует, что:

- максимальная эффективность процесса эжектирования достигается в переходном сечении струи;
- наиболее эффективной является та часть струи, размеры которой равны размерам ее начального участка;
- эффективность процесса эжекции увеличивается с увеличением плотности высоконапорной среды по сравнению с плотностью низконапорной среды и достигает своего максимума при отношении $P_B/P_H = 1 \times 10^3$, т.е. при эжектировании, например, воды воздухом;
- эффективность процесса эжектирования снижается с увеличением величины отношения давления высоконапорной среды к давлению низконапорной среды, что наиболее эффективно, процесс эжектирования будет протекать в аппарате, у которого расстояние от среза сопла (рис. 5) – сечение 0–0, до конца камеры смешения – сечение 1–1, равно длине начального участка струи, а площадь поперечного сечения 1–1 в конце камеры

смешения равна площади переходного сечения струи. Как следует из вышеизложенного, конструктивные размеры струйного аппарата и его технологические параметры зависят в основном от структуры и параметров струйного течения. На основании полученных теоретических зависимостей далее автором приводится расчет коэффициентов эжекции, восстановления давления и полезного действия для многосоплового струйного аппарата.

В третьей главе представлены экспериментальные исследования характеристик процесса эжектирования газа жидкостью в односопловых струйных аппаратах. Для проведения испытаний был разработан экспериментальный стенд, принцип действия которого заключался в следующем (рис. 5). Воздух нагнетается компрессором в эжектор и засасывает при этом из открытой емкости жидкость. После эжектора газожидкостная смесь подается в емкость, в которой происходит разделение жидкости и газа. Газ из емкости свободно выходит в атмосферу, а жидкость вновь подается в емкость.

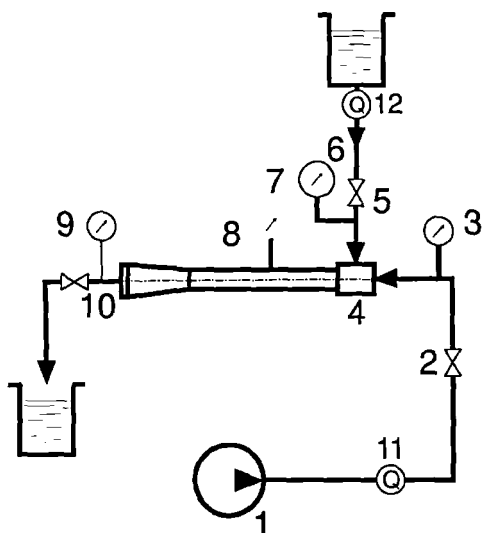


Рисунок 5 – Принципиальная схема экспериментального стенда: 1 – компрессор; 2 – регулировочный вентиль подачи высоконапорного газа в эжектор; 3 – манометр для измерения давления высоконапорного газа, подаваемого в эжектор; 4 – исследуемый эжектор; 5 – регулировочный вентиль подачи низконапорной жидкости в эжектор; 6 – вакуумметр; 7 – моновакуумметр; 8 – места измерения статического давления по длине проточной части эжектора (через 10 мм); 9 – манометр для измерения давления газожидкостной смеси; 10 – регулировочный вентиль, 11, 12 – расходомеры

Регулирование количества и давления газа при подаче ее в эжектор производят вентилями, установленными на нагнетательном трубопроводе. Количество и давление подаваемой жидкости в эжектор регулируется вентилем, установленным на патрубке входа жидкости в эжектор. Давление газожидкостной смеси на выходе из эжектора регулируется вентилем, установленном на трубопроводе, к которому подсоединен диффузор эжектора. Расходы жидкости и газа, поступающих в эжектор, измеряются с помощью диафрагм и дифференциальных манометров. При проведении эксперимента атмосферный воздух подавался воздуходувкой в эжектор, где смешивался с каплями модельной жидкости, образуя газокapельный дисперсный поток. Выбор геометрических параметров устройства осуществлялся на основе проведенных автором теоретических исследований. Дисперсность потока определялась размерами капель жидкости генерируемых различными распылительными устройствами. Далее, полученный газожидкостной (дисперсный) поток, со средним размером капель 5–10 мкм, 120–160 мкм и 300–500 мкм) поступал на модель эжектора, который представляет собой трубу из органического стекла, состоящую из четырех участков $L \times D = 1000 \times 50$, соединенных жесткой связью, в каждый из которых установлена, предварительно взвешенная, «гильза» из фильтровальной бумаги, на которой и происходит его осаждение. Расход воздуха для проведения экспериментов, выбирался с учетом критерия гидродинамического подобия, на основе того, что скорость газа движущегося в элементах оборудования и трубопроводах находится в пределах от 10 до 20 м/с. Результаты эксперимента обрабатывались стандартными методами математической статистики. Одновременно испытанию подвергались так же применяемые ныне устройства для ввода ингибитора форсунка и капельница с теми же параметрами, что и эжекторное устройство. Эффективность работы устройств ввода ингибитора определялось характером распределения жидкости дисперсного потока по исследуемой поверхности. Характер распределения также зависит от структуры газового потока (скорости течения, гидродинамики потока), и от его дисперсности (размера капель).

Для получения достоверных экспериментальных данных результаты экспериментов фиксировались через 10, 20 и 30 мин. После чего была проведена статистическая обработка результатов. В результате проведения экспериментов были получены экспериментальные данные количества жидкости, осевшей по длине экспериментального участка, зависящие от типа устройства.

В результате чего, были построены графики зависимости количества осевшей жидкости M на каждом из элементов экспериментального участка от дисперсности (размера капель d) газожидкостного потока $M_i^{y\text{тог}} = f(d)$ для эжектора ($d = 10\text{мкм}$), форсунки ($d = 50\text{мкм}$) и капельницы ($d = 500\text{мкм}$), где $M_i^{y\text{тог}} = M_i - m_i$, (g) – масса жидкости, осевшей на элементах экспериментального участка.

На графиках рисунков 6 и 7 видно количества жидкости осевшей на стенке экспериментального участка для эжектора, форсунки и капельницы, исходя из этого принимая эффективность работы эжектора за 100 %, получаем эффективность работы в % остальных устройств (форсунка и капельница).

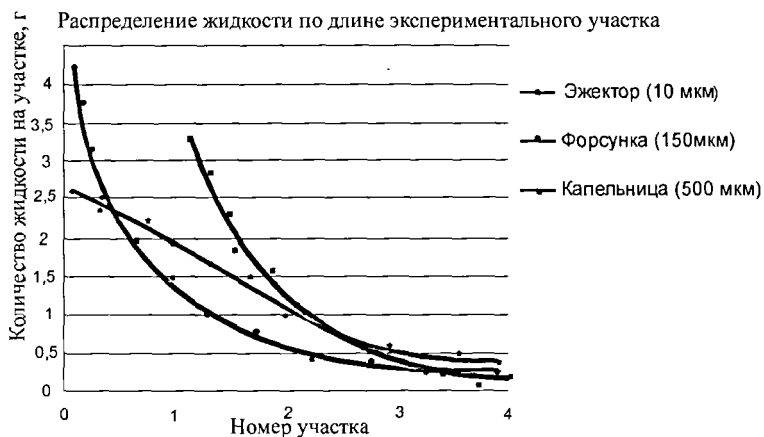


Рисунок 6 – Среднее значение распределения жидкости по длине экспериментального участка при скорости потока 13 м/с

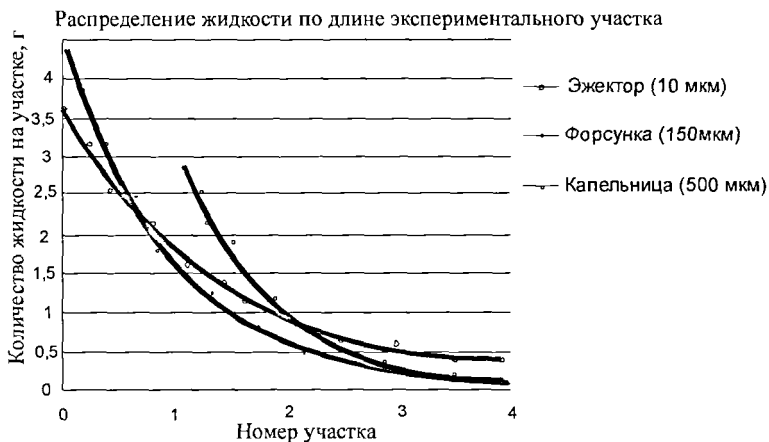


Рисунок 7 – Среднее значение распределения жидкости по длине экспериментального участка при скорости потока 24 м/с

На рисунках 8 и 9 представлены графики, сравнивающие эффективность работы устройств в зависимости от метода (ввода реагента) эжектора, форсунка, капельница (эффективность работы эжектора принята за 100 %).

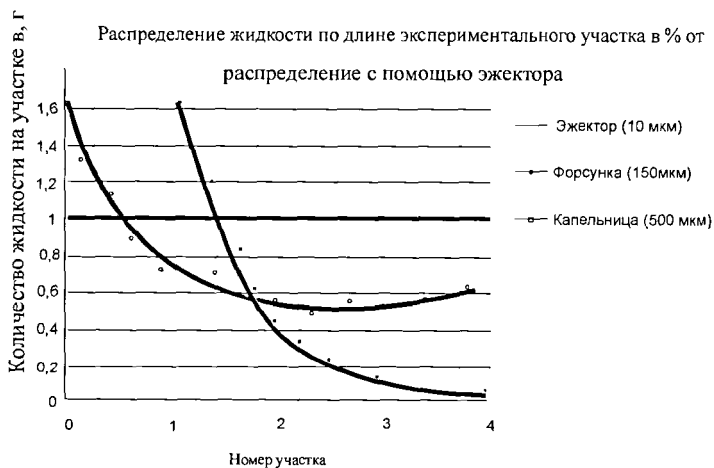


Рисунок 14 – Показатели эффективности работы устройств при скорости потока 13 м/с

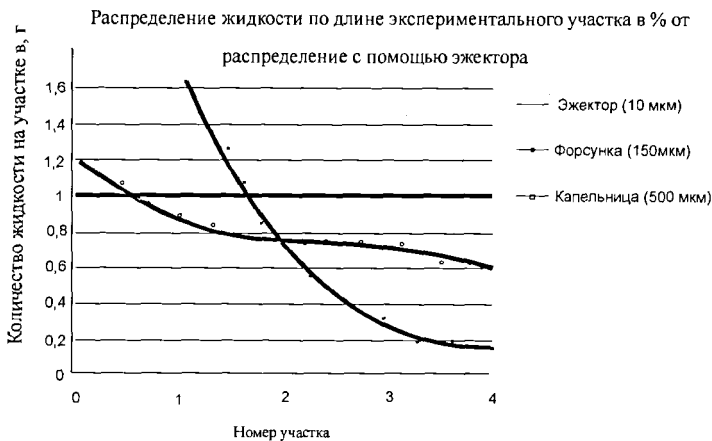


Рисунок 15 – Показатели эффективности работы устройств при скорости потока 24 м/с

В результате проведенных сравнительных стендовых испытаний для эжектора, форсунки и капельницы установлено:

- количество осевшей жидкости на конечном элементе экспериментального участка, после испытания форсунки, на 45 %, а после испытания капельницы – на 98 % меньше, чем после испытания эжектора;
- эжектора в 2 раза эффективнее форсунки и в 10 раз эффективнее капельницы.

Из графиков видно, что эффективность распыления решающим образом зависит от размера капель, вырабатывающихся распылительным устройством. Также эффективность обработки поверхности может зависеть от физических свойств жидкости (плотности, вязкости, поверхностного натяжения), подаваемой на распылительное устройство и гидродинамики газового потока. При обработке поверхностей трубопроводов, в которых имеет место движение газа с высокими скоростями (в турбулентных потоках), обработка поверхностей жидкостями, обладающим хорошими смачивающими свойствами (метанол), с применением эжектора не даст преимуществ в эффективности по сравнению с традиционными методами обработки (форсунка, капельница). Однако, при использовании жидкости с невысокими смачивающими свойствами (гликоли), применение эжектора даст значительные преимущества над стандартными методами обработки.

В местах установки технологического оборудования (сепараторы, теплообменники), где скорость газового потока сильно снижается, эжектор имеет значительное преимущество в эффективности перед традиционными методами обработки, вне зависимости от распыляемой жидкости. Например, при загидрачивании внутренних устройств сепараторов наиболее эффективным способом доставки ингибитора гидратообразования является эжектор, обладающий высокими проникающими свойствами, поскольку при подаче грубого аэрозоля большая его часть осядет на ступенях предварительной очистки. В этом случае, эффект от применения эжектора может существенно превысить результаты, полученные в данной работе.

Согласно выполненным автором, теоретическими и экспериментальными исследованиями были рассчитаны основные технологической параметры и размеры газо – жидкостного эжектора, а именно: объемный коэффициент эжекции K_0 ; коэффициент восстановления давления ψ ; коэффициент полезного действия η ; расход эжектируемой жидкости через аппарат; давление газожидкостной смеси на выходе аппарата P_D , радиус отверстия выхода сопла r_c , длину камеры смешения S_{kc} , число сопел n , диаметр камеры смешения d_{kc} . Кроме того, если эжектируемая жидкость и эжектирующий её газ состоят из смесей углеводородов, то рассчитаны кроме вышеперечисленного еще: температура T ; количество жидкой L и газовой G фаз на выходе эжектора; их компонентные составы X_b , Y_b , f ; также полный напор газожидкостной смеси P_{CT} перед диффузором струйного аппарата. Все расчетные схемы технологических параметров характеристики и основных размеров газо-жидкостного эжектора были разработаны в виде алгоритмов, реализованных на компьютере.

В четвертой главе приведена практическая реализация результатов исследования, а также даны теоретические основы расчета распределения температур в газосборной сети и сопротивлений при подаче метанола.

Система впрыска метанола в газосборную сеть достаточно проста как по составу оборудования, так и по системам управления процессом ввода ингибитора. Эжекторное устройство является последним, но немаловажным звеном в этой системе и от правильного дозирования и режимов впрыска ингибитора этим устройством в основном и зависят качественные показатели процесса предотвращения возникновения и ликвидации гидратных отложений в трубопроводах.

Метанол обычно вводится в поток газа, выше по течению от участка сети, где температура и давление газа могут упасть ниже точки гидратообразования. Как правило, места ввода метанола определяются таким образом, чтобы температура и давление в них был заведомо выше точки гидратообразования, что приводит к неоправданным затратам метанола. Решается задача оптимизации схемы ввода метанола, которая может быть сформулирована следующим образом: точки ввода метанола должны располагаться в началах шлейфов, при движении газа по которым температура и давление переходят через точку образования гидратов. Поэтому, после гидравлического расчета давлений в узловых точках сети и расходов на ее звеньях, должен быть произведен расчет распределения температуры в узловых точках сети. Зная давления и температуры в концевых точках шлейфов, и зная, что эти величины могут только убывать в направлении течения газа по шлейфу, можно проверить условие гидратообразования в каждом узле сети. Если в начале шлейфа это условие выполнено, а в конце – нет, то в этом шлейфе образуются гидраты, и метанол надо вводить в его начальный узел, причем с расходом, соответствующим расходу газа в этом шлейфе. Таким образом, при наличии гидравлического расчета, оптимизация ввода метанола, на первом этапе, сводится к решению задачи о распределении температуры в газовой сети.

В данной работе предлагается модель, одномерная с точки зрения движения газа, но учитывающая перенос тепла поперек потока. Эта модель, с одной стороны, достаточно проста, легко алгоритмируется и реализуется на компьютере, а с другой стороны, информация о физических свойствах процесса в ней сводится к двум безразмерным параметрам, один из которых (условно) отвечает за теплопередачу от газа к стенке, а другой – за теплоперенос внутри самого газа.

В основу положено понятие существования внутри живого сечения потока газа турбулентного ядра, в котором происходит интенсивный конвекционный поперечный теплообмен, и усредненную по времени температуру можно считать одинаковой во всем сечении. При быстром течении у стенки трубы практически отсутствует пограничный слой, и можно считать, что скорость течения газа характеризуется одним средним значением U . Распределение температуры, в отличие от распределения скоростей при этом, нельзя считать постоянным, хотя бы потому, что в отличие от газа,

тепло проникает сквозь стенку трубы. Рассмотрим координаты x , r соответственно вдоль и поперек трубы, при этом x отмеряется от начала шлейфа, а r — от осевой линии трубы. Температуру, усредненную по времени, будем считать зависящей от этих координат $T(x, r)$ и подчиняющейся линейному стационарному уравнению теплопроводности:

$$V \frac{\partial T}{\partial x} = \mu \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right), \quad (9)$$

здесь $\mu = \lambda \rho c$, λ — коэффициент теплопроводности газа, ρ , c — это плотность и теплоемкость газа соответственно (под теплоемкостью понимается теплоемкость при постоянном объеме). Решение этого уравнения производится со следующими граничными условиями:

$$T(0, R) = T_0; \quad T(x, R) = T, \quad (10)$$

здесь R — это радиус трубы, $T(0, R) > T$. — это температуры в начале шлейфа и на стенке трубы соответственно.

При обезразмеривании уравнение (9) примет вид (безразмерные переменные обозначены теми же буквами, масштаб длины — R):

$$\frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\mu}{V \cdot R} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right). \quad (11)$$

Для условий течений в газовой сети можно считать, что $\varepsilon = \mu VR \ll 1, R-r \sim y\sqrt{\varepsilon}$. Решение этой задачи, после математических преобразований и перехода к размерным величинам, дает следующий результат:

$$\frac{\partial T}{\partial x} = \frac{4}{D} \sqrt{\frac{\pi \cdot \mu}{V \cdot x} \frac{T_0 - T}{\pi + \frac{\lambda}{\Lambda} \sqrt{\frac{\pi \cdot V}{\mu \cdot x}}}}, \quad (12)$$

здесь $T(x)$ — температура газа, $T_0(x)$, T_0 — температура внутренней и внешней стороны стенки трубопровода, соответственно, Λ — коэффициент теплопроводности стенки трубы, значение которого может быть определено с учетом наличия тонкого пристенного слоя, движение газа в котором не может быть охарактеризовано скоростью V . При этом температура внешней стенки считается не зависящей от температуры газа, а температура внутренней стенки — зависящей (под стенкой трубы понимается не только металл, но и теплоизоляция).

Отсюда видно, что если величины V/μ и x увеличить или уменьшить в одно и то же число раз, то истинность уравнения не нарушится. Это равносильно тому, что величины ε , x можно уменьшить или увеличить в одно и то же число раз, что будет применено при организации вычислительной процедуры в алгоритме расчета распределения температур в газовой сети.

При постановке задачи о расчете распределения температур в газовой сети считаются известными следующие данные:

- а) температуры в конечных точках сети;
- б) массовые расходы газа на звеньях сети, которые определяются гидравлическим расчетом;

в) все физические величины, входящие уравнение (11), кроме $T(x)$.

Алгоритм расчета состоит в следующем:

1) температуры в промежуточных узлах сети может задаваться сначала произвольно. Затем для каждого звена (шлейфа), зная температуру в его начале, численным интегрированием уравнения (9), вычисляется температура в его конце;

2) в каждом промежуточном узле, зная массовые расходы Q_i и температуры T_i газа, в него входящего определяется температура газа (в нем) по формуле, являющейся прямым следствием сохранения массы и энергии, (сумма берется по звеньям, входящим в узел):

$$T = \sum_i Q_i \cdot T_i / \sum_i Q_i. \quad (13)$$

После этого температуры в промежуточных узлах получают новые значения. Используя эти значения, снова производится операция, описанная в первом пункте. Данная итерационная процедура неминуемо сходится, причем за конечное число шагов, которое можно оценить, имея топологическую схему сети.

На основании этой модели была разработана программа управления подачей метанола, которая выполняет следующие действия:

а) определяет звенья сети, на которых происходит гидратообразование;

б) строит топологическую схему сети метанола для подачи его в начальные узлы вышеуказанных участков;

в) определяет расходы метанола в соответствии с расходами газа (отношение массовых расходов $Q_{мет}/Q_{газ} = D$ – доза подачи метанола, задается);

г) определяет коэффициенты гидравлических сопротивлений дросселей в точках ввода метанола внутрь газопровода.

При этом плотность, вязкость метанола, шероховатость труб и давление на входе в метанолопровод задаются. С учетом ввода метанола на вышеуказанные звенья газовой сети, где образуются гидраты, программа расчета метанолопровода дает возможность установить: номера звеньев, где образуются гидраты, коэффициенты сопротивлений дросселей «Z», расходы метанола (массовые), и давления в промежуточных узлах метанолопровода.

Разработанные алгоритмы, и программы их реализующие, работают быстро и надежно, просты в применении, что позволяет, использовать их либо непосредственно для практических расчетов, либо включить, как со-

ставные части, в автоматическую систему управления и контроля при эксплуатации газового месторождения. Такая программа, с разработанным автором устройством для впрыска метанола в трубопровод, была внедрена на КС «Береговая» для предупреждения гидратообразований технологических трубопроводов в зимний период.

Экономический эффект от использования разработанных автором устройства для эжекторного впрыска метанола в трубопровод и программного обеспечения в составе установки для автоматического ввода метанола по экспертным данным составляет 0,8 млн руб. в год.

ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

В настоящей работе изложены научно-обоснованные разработки направленные на совершенствование средств обеспечения безаварийной работы систем промышленного сбора и подготовки газа путем разработки эффективного эжекторного струйного аппарата для дозированного ввода метанола гидратообразования в промышленные газопроводы и технологическое оборудование с целью ликвидации и предотвращения возникновения гидратообразований.

На основании теоретических и экспериментальных исследований получены следующие научные и практические результаты:

1. Предложен способ ввода метанола в трубопровод с помощью эжекторных струйных аппаратов, в котором реализованы полученные экспериментальным путем данные по эффективности процесса захвата высоконапорной среды газа низконапорной средой метанола.

2. На базе теоретических и экспериментальных исследований научно обоснованы гидрогазодинамические характеристики работы односопловых струйных эжекторных аппаратов для ввода ингибитора в промышленный газопровод.

3. На основании комплексной методики разработан алгоритм расчета газодинамических и геометрических параметров односоплового эжекторного устройства.

4. Разработаны теоретические основы расчета распределения температур в газосборной сети и сопротивлений при подаче метанола

5. На основании предложенных автором теоретических основ разработано программное обеспечение расчета распределения температур в газосборной сети и сопротивлений при подаче метанола для систем автоматической дозированной подачи метанола

6. Внедрение в производство разработанного автором эжекторного струйного аппарата позволит:

- решить проблему гидратообразования в промышленных газопроводах и на установках комплексной подготовки газа путем установки разработанного устройства ввода;
- повысить степень энергосбережения на промыслах, за счет сни-

жения затрат на подачу ингибитора насосами дозаторами и использования энергии давления газа;

- снизить расход ингибитора благодаря высокой степени дисперсности вводимого ингибитора.

7. Разработанная методика расчета струйного аппарата может быть использована для систем впрыска метанола с помощью эжектора как на вновь проектируемом, так и на уже эксплуатируемом промышленном газопроводе.

8. Доказано, что разработанный аппарат и способ ввода ингибитора в промышленный газопровод более эффективен по сравнению с традиционными методами, что подтверждается соответствующим заключением о внедрении.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК

1. Бойко С.И., Поляков А.В., Кунина П.С., Терещенко И.А. Применение односоплового эжекционного струйного аппарата для ввода ингибитора в промышленный газопровод // Электронный научный журнал "Нефтегазовое дело". – Уфа, 2012. – № 1 – С. 150–157.

2. Павленко П.П., Поляков А.В., Бойко С.И., Кунина П.С. Способ ввода ингибитора в промышленный газопровод с помощью односоплового эжекционного струйного аппарата // Ежемесячный научно-технический журнал «Газовая промышленность», май 2012. – № 674. – С. 43–48.

3. Кунина П.С., Поляков А.В. Устройство и способ ввода реагента в систему промышленного оборудования для предотвращения гидратообразования // Международная научно-практическая конференция «Сбор, подготовка и транспортировка углеводородов – 2012». – Сочи, 19–24 марта 2012 г. – С. 137–142.

4. Бунякин А.В., Пурихов А.В., Поляков А.В. Распределение температур в газосборной сети скважины – УКПГ и сопротивлений при подаче метанола // Международная научно-практическая конференция «Сбор, подготовка и транспортировка углеводородов – 2012». – Сочи, 19–24 марта 2012 г. – С. 119–127.

5. Поляков А.В., Терещенко И.А., Литра А.Н. Моделирование изменения теплообмена поверхности оборудования при образовании инея // Ежемесячный научно-технический журнал "Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море", июнь 2012. – № 6. – С. 43–48.

Патенты на изобретения

6. Бурдыло Е.В., Поляков А.В., Кунина П.С. Двухфазный вихревой теплогенератор. Патент на изобретение № 2431087 от 10.10.2011.

7. Бурдыло Е.В., Поляков А.В., Кунина П.С. Двухфазный вихревой теплогенератор. Патент на полезную модель № 98553 от 20.10.2010.

8. Литра А.Н., Поляков А.В., Кунина П.С. Проточный разделитель. Патент на полезную модель № 107070 от 10.08.2011.

9. Литра А.Н., Поляков А.В., Кунина П.С. Прямоточный спиральный сепаратор. Патент на изобретение № 2424846 от 27.07.2011.

10. Литра А.Н., Поляков А.В., Кунина П.С. Прямоточный спиральный сепаратор. Патент на полезную модель № 94479 от 27.05.2010.

Подписано в печать 27.04.2012. Печать трафаретная.
Формат 60x84 1/16. Усл. печ. л. 1,35. Тираж 100 экз. Заказ № 654.
ООО «Издательский Дом-Юг»
350072, г. Краснодар, ул. Московская 2, корп. «В», оф. В-120
тел. 8-918-41-50-571

e-mail: olfomenko@yandex.ru Сайт: <http://id-yug.narod2.ru>