

УДК 553.981:66.074.1

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ АЭРОМЕХАНИЧЕСКОГО МЕТОДА ДЛЯ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ ГИДРАТООБРАЗОВАНИЯ ПРИ ПОДГОТОВКЕ И ТРАНСПОРТИРОВКЕ ПРИРОДНОГО ГАЗА И КОНДЕНСАТА

Волков П.В., Зятиков П.Н., Большунов А.В.

*Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск,
e-mail: tpuipr@mail.ru*

Актуальность работы обусловлена необходимостью бесперебойной транспортировки газа и конденсата на межпромысловых и внутрипромысловых трубопроводах. В данной работе проанализированы результаты экспериментов на лабораторном стенде, который предотвращает гидратообразование. Принцип работы установки основан на аэромеханическом воздействии на поток смеси. Применяемые методы исследования: экспериментальные исследования на установке для теплофизического и аэромеханического воздействия для предотвращения гидратообразования методом моделирования условий реальной среды; методы использования и анализа удаления аналогичных частиц из потока газа. Результатом данной работы служит обоснование выбора способа воздействия на гидраты аэромеханическими методами и последующие рекомендации при строительстве опытно-промышленного образца для нефтегазодобывающих компаний и компаний по транспорту нефти и газа. Также в результате работы будет создано программное обеспечение, которое будет моделировать процесс образования гидратов, рассчитывать эффективность циклона для отделения газов от гидратов и определять оптимальные термобарические параметры. Программное обеспечение будет регулировать термобарические параметры, расход смеси и контроль ее качества. К данной модели привязаны различные блокировки для предотвращения аварии, будут установлены различные сигнализаторы аналогового и дискретного типа. Весь процесс при расчете с реальной средой будет моделироваться в программном продукте HYSYS. Входные параметры имеют реальные значения, которые предоставляет лаборатория промысла, а именно: состав газа, плотность, точка росы, содержание свободной воды, температура и давление на момент отбора пробы. При моделировании процесса и проведении экспериментов представлена общая структурная модель.

Ключевые слова: гидратообразование, циклон, экспериментальная установка, гидроаэромеханический метод, подготовка газа

RESEARCH AND COMBINED APPLICATION OF HYDRO-AEROMECHANICAL METHODS FOR PREVENTION OF HYDRATE FORMATION AT PREPARATION OF GAS

Volkov P.V., Zyatikov P.N., Bolchunov A.V.

National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, e-mail: tpuipr@mail.ru

The relevance of the discussed issue is caused by the need for uninterrupted transportation of gas and condensate on inter-field and infield pipelines. In this work experiments are conducted on a laboratory bench, which prevents hydration. The principle of operation of the plant is based on the aeromechanical effect on the flow of the mixture. Applied research methods: experimental studies on the installation for thermophysical and aeromechanical effects to prevent hydrate formation by modeling the conditions of the real environment; methods of using and analyzing the removal of similar particles from the gas stream. The result of this work is the substantiation of the choice of the method of influencing hydrates by aeromechanical methods and subsequent recommendations for the construction of a pilot model for oil and gas companies and oil and gas transportation companies. Also, as a result of the work, software will be created that will simulate the process of hydrate formation, calculate the cyclone efficiency for separating gases from hydrates and determine optimal thermobaric parameters. The software will regulate the thermobaric parameters, the consumption of the mixture and the control of its quality. Also, various interlocks will be tied to this model to prevent an accident, and various analog and discrete alarms will be installed. The whole process in the calculation with the real environment will be modeled in the software product HYSYS. The input data will have a real value, which is provided by the oilfield laboratory, namely: gas composition, density, dew point, free water content, temperature and pressure at the time of sampling. In modeling the process and carrying out the experiments, a general structural model will be provided.

Keywords: hydrate formation, cyclone, experimental installation, hydroaeromechanical method, gas preparation

В настоящее время на большинстве газовых и газоконденсатных месторождений России происходит заметное снижение пластового давления природного газа, что ведет к увеличению его начального влагосодержания. В значительной степени от эффективности и массо-габаритных характе-

ристик работы разделительной аппаратуры зависят капиталовложения и эксплуатационные затраты, количество и качество вырабатываемых продуктов и межремонтный период технологических установок. Проблема образования гидратов на внутрипромысловых и магистральных трубопрово-

дов очень актуальна. Скопление гидратов в сечении трубы приводит к уменьшению пропускной способности, дополнительной дросселизации потока, а в некоторых случаях и его полной остановке. Основным методом борьбы с гидратообразованием в промышленных масштабах – подача метанола в объеме идентичном сечению трубопровода, его длины и степени оседания и прилипания гидратов на участке. Также применяют подогрев газа или корпуса трубопроводов [1].

Цель исследования: разработать и испытать экспериментальный стенд для борьбы с гидратообразованием в реальных условиях. Сымитировать условия реальной среды и реального сырья, смоделировать весь процесс в программе HYSYS.

Материалы и методы исследования

Материалы и методы исследования: экспериментальный стенд, разработанный и установленный на базе Томского политехнического университета. Методом исследования являются эксперименты с различными термобарическими параметрами, которые имитируют реальные условия транспортировки газоконденсатной смеси. Также методом исследования является дублирование процесса в программном продукте HYSYS, который имеет возможность вносить различные сходные данные, например толщина грунта, толщина стенки, компонентный состав, протяженность трубопровода.

Установка для аэромеханического воздействия для предотвращения гидратообразования

Основные задачи, которые решались в рамках физического моделирования экспериментальной установки:

- расчет количества подачи гидратов на установку, обеспечивающие их смешение и максимальную степень улавливания в результате прохождения через циклон;
- определение тепловых и газодинамических потоков внутри аппарата и оптимальных конструктивных параметров установки;
- определение оптимальных рабочих параметров работы установки – температуры, давления, расхода исходного количества гидратов, температуры и давления на установке и другие характеристики, влияющие на процесс удаления гидратов;
- выдача рекомендаций к проектированию опытного аппарата.

Программный комплекс HYSYS

Перед проведением эксперимента рассматривается его модель в программном продукте HYSYS для проведения более точного результата. Анализируются входной и выходной составы в зависимости от термобарических условий, технических характеристик трубопровода и среды. Использование программы HYSYS позволяет максимально приблизить условия эксперимента к реальным условиям.

Теоретическая часть

Общий расход воздуха, используемый в проточной части установки, приближенно измеряется трубкой Пито – Прандтля в центре среза измерительной трубы. Принцип измерения заключается в измерении трубкой Пито максимальной скорости потока в центре измерительной трубы. Далее, по кривой Никурадзе (рис. 1), находится средняя скорость по всему сечению трубы. По найденному значению средней скорости и площади сечения измерительной трубы вычисляется расход воздуха [2, 3].

$$Q = v_{cp} S - \text{общий расход воздуха (м}^3/\text{с)}$$

$$v_{\max} = \sqrt{\frac{2gP_d}{\rho_v}} - \text{максимальная скорость потока воздуха (м/с), где } P_d - \text{перепад давления измеренный трубкой Пито (мм вод. ст.), размерность соответствует размерности кг/м}^2.$$

На рис. 2 детально представлен эжектор. Все обозначения элементов указаны на рисунке.

Подробный принцип действия экспериментальной установки описан в предыдущей статье [5]. В настоящее время были проведены эксперименты с дисперсностью реагента в 1,5–2 мм при скорости потока от 2 до 5 м/с с расходом до 15 м³/ч. Минимальное время нагревания температуры теплоносителя форбункера составило 15 с. По результатам исследований будут произведены расчеты потерь тепла, даны рекомендации по изменению мощности и типу теплоносителя, будут проанализированы термобарические параметры смеси и максимальная дисперсность частиц, которая может проходить через установку. На (рис. 3) представлена зависимость времени возвращения температуры теплоносителя к исходному значению от количества гидратов (концентрации потока). Задача экспериментальных наблюдений – свести параметр $\Delta t \rightarrow 0$ [4, 5].

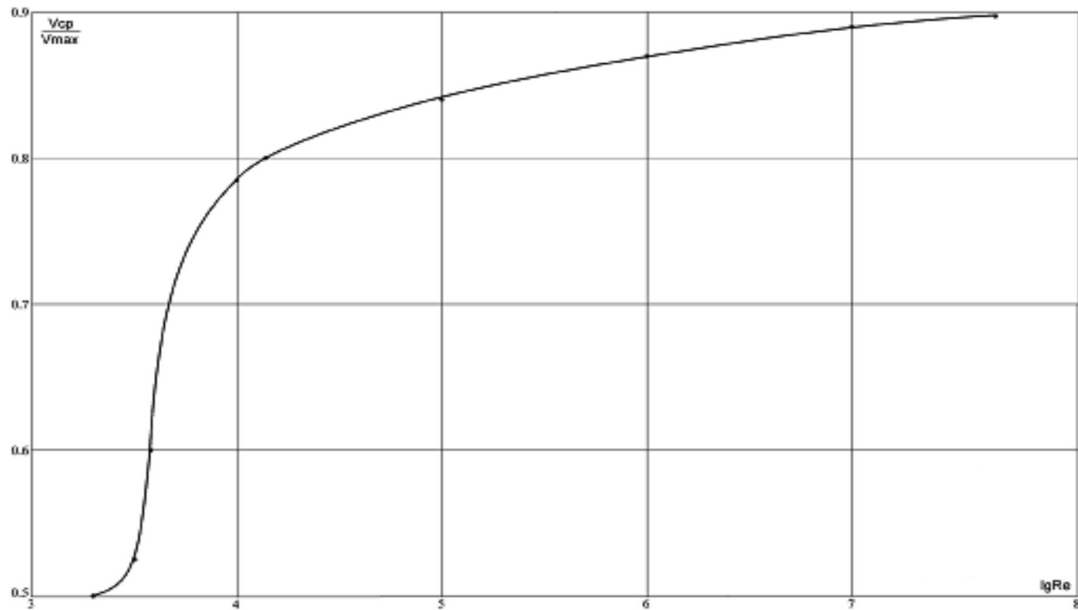
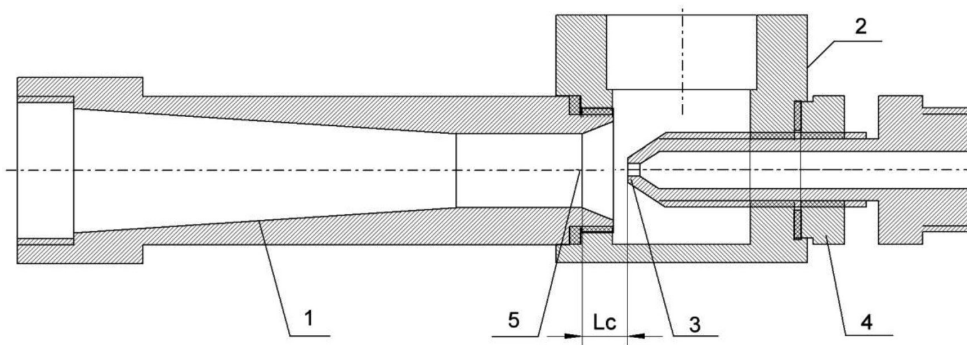


Рис. 1. Кривая Никурадзе [3]



1- диффузор, 2 - приемная камера, 3 - регулируемое сопло, 4 - конtringайка, 5 - смешительный участок.

Рис. 2. Схема эжектора [4]

Результаты исследования и их обсуждение

Проведем эксперимент с постоянным коэффициентом эжекции, диаметром сопла $d = 4$ мм и массой льда 45 г. Температура воздуха в форбункере и температура теплоносителя также остаются неизменными.

Узнаем, за сколько секунд восстановится температура воздуха в форбункере и температура теплоносителя после засыпания гидрата до первоначальных значений. t_1 – температура теплоносителя, $^{\circ}\text{C}$; t_2 – температура воздуха в форбункере, $^{\circ}\text{C}$;

L_c – расстояние от среза сопла до начала смешительного участка, мм; D_c – диаметр сопла, мм. Результаты занесены в табл. 1.

По данным таблицы видно: чем меньше концентрация, тем меньше время необходимого для восстановления температуры воздуха в форбункере и температуры теплоносителя до первоначальных значений.

Проведем эксперимент по удалению воды с постоянным давлением подачи, с постоянным коэффициентом эжекции, с массой воды $m = 150$ г, с диаметром сопла $d = 4$ мм. Необходимо определить массу вылетевшей воды. Результаты занесены в табл. 2.

Таблица 1

Результаты эксперимента с постоянной массой льда и коэффициента эжекции

| Р подачи, атм | Lс, мм | t время засыпания льда, с | Масса льда, г | t ₁ воздуха в форбункере, С° | t ₂ теплоносителя, С° | τ время восстановления, с |
|---------------|--------|---------------------------|---------------|---|----------------------------------|---------------------------|
| 1 | 5 | 20 | 45 | 40 | 65 | 240 |
| 2 | 5 | 15 | 45 | 40 | 65 | 325 |
| 3 | 5 | 10 | 45 | 40 | 65 | 390 |

Таблица 2

Результаты эксперимента по определению выноса воды из установки с постоянным давлением на входе в установку и постоянным диаметров сопла

| Р подачи, атм | Lс, мм | Концентрация частиц, г/с | Масса воды, г | m, масса вылетевшей воды после прохождения циклона, г |
|---------------|--------|--------------------------|---------------|---|
| 1 | 4 | 2,50 | 150 | ~1,23 |
| | | 1,66 | | ~0,67 |
| | | 1,25 | | ~0,34 |
| 2 | 4 | 2,50 | 150 | ~1,65 |
| | | 1,66 | | ~1,32 |
| | | 1,25 | | ~0,91 |
| 3 | 4 | 2,50 | 150 | ~2,03 |
| | | 1,66 | | ~1,74 |
| | | 1,25 | | ~1,33 |

Таблица 3

Результаты эксперимента с постоянным давлением на входе в установку, постоянным коэффициентом эжекции и постоянной массой мехпримесей m = 150 г

| Р подачи, атм | Lс, мм | Концентрация частиц, г/с | m, масса вылетевшего мехпримеси после прохождения циклона, г |
|---------------|--------|--------------------------|--|
| 1 | 5 | 2,50 | ~1,34 |
| | | 1,66 | ~1,12 |
| | | 1,25 | ~0,76 |
| 2 | 5 | 2,50 | ~1,76 |
| | | 1,66 | ~1,24 |
| | | 1,25 | ~0,87 |
| 3 | 5 | 2,50 | ~2,28 |
| | | 1,66 | ~1,89 |
| | | 1,25 | ~1,54 |

Эксперимент показал возможность удаления воды из потока смеси более чем на 98,64%.

Проведем эксперимент по удалению механических примесей с постоянным давлением подачи, с постоянным коэффициентом эжекции, с массой механической примеси m = 150 г, дисперсностью 1–2 мм, с диаметром сопла d = 4 мм. Узнаем массу вылетевшей механической примеси. Результаты занесены в табл. 3.

Эксперимент показал возможность удаления мехпримесей более чем на 98,48%.

Проведем эксперимент с постоянным давлением подачи P = 1 атм, с постоянным

коэффициентом эжекции, с массой льда m = 150 г с дисперсностью 2–4 мм, с диаметром сопла d = 4 мм. Температура воздуха в форбункере и температура теплоносителя также остаются неизменными. Узнаем массу вылетевшего льда после прохождения циклона. Результаты занесены в табл. 4.

По результатам эксперимента видно, что данная экспериментальная установка удаляет лед на >98,09% в зависимости от концентрации и давления подачи газа. Графическое отображение результатов эксперимента № 4 отобразим на рис. 4.

Таблица 4

Результаты эксперимента с постоянным давлением на входе в установку и постоянным коэффициентом эжекции

| Lс, мм | | t ₁ воздуха в форбункере, °С | t ₂ теплоносителя, °С | m, масса вылетевшего льда после прохождения циклона, г |
|--------|------|---|----------------------------------|--|
| 4 | 2,50 | 45 | 65 | ~1,69 |
| | 1,66 | | | ~1,42 |
| | 1,25 | | | ~1,23 |
| 4 | 2,50 | 45 | 65 | ~2,12 |
| | 1,66 | | | ~1,86 |
| | 1,25 | | | ~1,56 |
| 4 | 2,50 | 45 | 65 | ~2,87 |
| | 1,66 | | | ~2,43 |
| | 1,25 | | | ~1,98 |

Зависимость степени отделения льда от концентрации

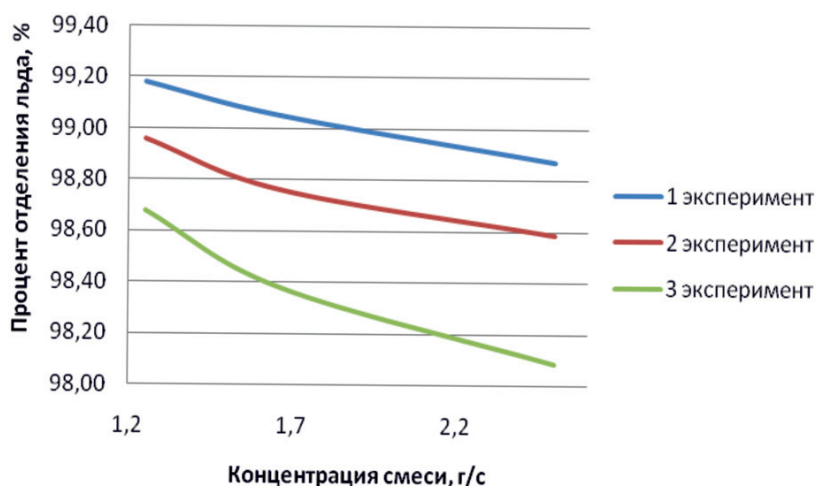


Рис. 3. Результаты эксперимента по отделению льда из потока газа

Выводы

В данной работе были проанализированы результаты четырех экспериментов. Основной целью данных опытов была необходимость имитации движения потока газа в трубе в реальных условиях и возможность отделения льда из данной смеси (в реальных условиях – гидрата). Была проанализирована работоспособность разработанной установки экспериментальным путем. Были получены и интерпретированы результаты, выданы рекомендации для проведения усовершенствований измерений путем увеличения количества входных данных в программе HYSYS. При проведении экспериментов на экспериментальном стен-

де улавливания гидратов были использованы различные примеси, а именно лед, мех-примеси и вода. Все эти элементы из потока газа были удалены более чем на 98 %, что показывает эффективность работы установки во всех режимах. На рис. 3 показана степень отделения льда при различной концентрации, из графика видно, что степень отделения зависит от концентрации обратно пропорционально. В настоящее время по результатам экспериментов проводятся дополнительные настройки аппарата для отделения 99,9 % примесей при минимальных и средних концентрациях льда. Также производится расчет теплообменника для достижения условия $\Delta t \rightarrow 0$ при восстановлении температуры теплоносителя.

Список литературы / References

1. Бухгалтер Э.Б. Метанол и его использование. М.: Недра, 1986. 240 с.

Bukhgalter E.B. Metanol and his use. M.: Nedra, 1986. 240 p. (in Russian).

2. Ахмедов М.И. Технология очистки метанолсодержащих сточных вод нефтегазоконденсатных месторождений // Нефтяное хозяйство. 2016. № 5. С. 106–108.

Akhmedov M.I. Technology for treating methanol-containing sewage from oil and gas fields // Neftyanoe khozyajstvo. 2016. № 5. P. 106–108 (in Russian).

3. Мустафаев А.М., Гутман Б.М. Теория и конструкция гидроциклона. М.: Недра, 1986. 172 с.

Mustafaev A.M., Gutman B.M. Theory and design of hydrocyclone. M.: Nedra, 1999. 172 p. (in Russian).

4. Тимербаев А.С., Лишук А.Н. Исследование особенностей процесса разделения водонефтяных эмульсий в центробежном сепараторе с крыльчаткой // Нефтяное хозяйство. 2014. № 12. С. 138–141.

Timerbaev A.S., Lishchuk A.N. Investigation of the features of the process of separation of water-oil emulsions in a centrifugal separator with an impeller // Oil Industry. 2014. No 12. P. 138–141. (in Russian).

5. Волков П.В., Зятиков П.Н., Большунов А.В. Исследование и комплексное применение гидроаэромеханических методов для предотвращения гидратообразования при подготовке газа // Успехи современного естествознания. 2017. № 9. С. 52–56.

Volkov P.V., Zyatikov P.N., Bolchunov A.V. Research and combined application of hydro-aeromechanical methods for prevention of hydrate formation at preparation of gas // Advances in current natural sciences. 2017. № 9. C. 52–56 (in Russian).