

УДК 66.074.1

## ИССЛЕДОВАНИЕ И КОМПЛЕКСНОЕ ПРИМЕНЕНИЕ ГИДРОАЭРОМЕХАНИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ДЛЯ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ ГИДРАТООБРАЗОВАНИЯ ПРИ ПОДГОТОВКЕ ГАЗА

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

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

Актуальность работы обусловлена необходимостью промышленной подготовки газа, а именно очистки от механических примесей и гидратов. Целью работы является обоснование выбора способа воздействия на гидраты и способа очистки от механических примесей гидроаэромеханическими методами и последующая разработка новой установки для подготовки газа на УКПГ (установка комплексной подготовки газа), создание программного продукта, который будет моделировать процесс образования гидратов, расчет эффективного цикла для отделения газов от гидратов и определение оптимальных термобарических параметров. Применяемые методы исследования: экспериментальные исследования на установке для теплофизического воздействия для предотвращения гидратообразования методом моделирования условий реальной среды; методы использования и анализа удаления аналогичных частиц из потока газа. Результатом данной работы является создание нового экспериментального стенда, который зарегистрирован в ТПУ (Томский политехнический университет), для проведения экспериментов по удалению гидратов и механических примесей из потока газа. Разработана и опробована схема удаления механических примесей из потока газа при различном расходе реагента.

**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 to prepare the gas namely the purification of mechanical impurities and hydrates. The main aim of the study is to justify the choice of the method for influencing hydrates and the method of purification from mechanical impurities by hydro aeromechanical methods and the subsequent development of a new unit for gas treatment at the GPP (complex gas preparation unit), the creation of a software product that will calculate the energy carrier, Gas composition and thermo baric parameters. The methods used in the study: experimental studies on the unit for thermophysical 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 creating a new experimental unit which is registered and is put on the balance of TPU (Tomsk Polytechnic University) for carrying out experiments to remove hydrates and various particles from the gas stream. The modeling of the processes taking place in the complex preparation of real gas on an industrial scale has been carried out. Develop and test a system for removing mechanical impurities from the gas stream at different reagent flow rates.

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

В настоящее время проблема образования гидратов на внутривысоконапорных и магистральных трубопроводах очень актуальна. Скопление гидратов в сечении трубы приводит к уменьшению пропускной способности, дополнительной дросселиции 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.

### Образование гидратов

Гидратообразованием называется процесс объединения молекул газа с водой, воз-

никающий при уменьшении температуры и увеличении давления газожидкостного потока внутри трубопровода. Данная реакция приводит к образованию гидратов, которые представляют собой белые кристаллы, похожие на снегообразную кристаллическую массу. На рис. 1 указаны параметры образования кристаллов гидрата метана [1].

Газ, поступающий из скважин, содержит влагу в жидкой и паровой фазе. Жидкая фаза извлекается сепараторами различной конструкции. С помощью установок осушки газа на головных сооружениях снижается содержание паров воды. При низком качестве осушки газа в газопроводе конденсируется влага и образуются кристаллогидраты, в результате чего снижается его пропускная способность. Максимальное содержание

влаги в газе (в г на 1 м<sup>3</sup> сухого газа) приближенно определяют по графику при температуре 20 °С и давлении 0,1013 МПа [2–4].

Кроме основных условий образования гидратов, существуют побочные: турбулентность движения газа, пульсации, наблюдающиеся при работе двигателей, резкие повороты ЛЧ МГ, сужения трубы и другие факторы, приводящие к перемешиванию газового потока [5]. Местонахождение гидратной пробки определяют замером давления на трассе по повышенному перепаду давлений на каком-либо участке при помощи радиолокационной антенны и передвижной радиолокационной станции, просвечиванием труб гамма-излучением с помощью радиоизотопного прибора РИК-6М. Максимальное содержание влаги (при полном насыщении) зависит от состава газа, возрастая с увеличением содержания тяжелых углеводородов, сероводорода и углекислого газа и снижаясь с повышением содержания азота [5].

(рис. 1), которая включает баллон со сжатым газом (азот, воздух, 40 л), эжектор с кольцевым соплом и приёмной воронкой, циклон с форбункером и его подогревом и фильтр для очистки газа. Основные задачи, которые решались в рамках физического моделирования экспериментальной установки:

- расчет 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, расходов исходных гидратов, температуры и давления на установке и другие характеристики, влияющие на процесс удаления гидратов;
- выдача рекомендаций к проектированию опытного аппарата.



Рис. 1. Области образования и разрушения гидратов газа метана [1]

### Установка для теплофизического воздействия для предотвращения гидратообразования

Целью данной разработки является создание экспериментальной установки для борьбы с гидратообразованиями гидроаэромеханическими методами. Пропускная способность установки должна быть до 100 м<sup>3</sup>/час газа в реальных условиях [6–7]. В качестве моделирования процесса борьбы с гидратообразованием предложена схема

### Механизм разрушения и удаления гидратов на экспериментальной установке гидроаэромеханическим методом

В приемную воронку 1 помещается лед (который по своим свойствам наиболее близок к кристаллам гидратов) с дисперсностью частиц до 8 мм. Из баллона через регулятор давления 4 и игольчатый вентиль 5 подается воздух с необходимым давлением на эжектор 2. В результате эжекционного эффекта образуется движе-

ние газового потока с кристаллами льда по транспортной трубе ( $D_y = 20$  мм), затем двухфазный поток поступает в циклон 8, который отделяет твердую примесь потока и отправляет его вниз в форбункер с подогревом 9, где лед (в реальной системе – гидрат) разрушается. Газ продолжает движение дальше, где выходит из системы, а на выходе происходит процесс улавливания в приемной камере 13 (фильтр). Схема экспериментальной установки представлена на рис. 2.

### Основные требования к физической модели установки улавливания гидратов

1. Газ-имитатор, который будет использоваться в экспериментальном стенде – воздух, азот.

2. Диапазон изменения расхода газа – от  $20 \text{ м}^3/\text{ч}$  до  $100 \text{ м}^3/\text{ч}$ . При расходе воздуха  $50 \text{ м}^3/\text{ч}$  через диаметр трубопровода 20 мм средняя скорость потока газа будет  $44,21 \text{ м/с}$ . Давление газа в трубопроводе от 1 атм до 2 атм. Температура газа в трубопроводе  $5\text{--}25^\circ\text{C}$ .

3. Отношение диаметра транспортного трубопровода к диаметру (наибольшему сечению) частиц гидрата 3.

Число Рейнольдса:

$$Re = \nu \rho d / \mu,$$

где  $\nu$  – характерная скорость газа, м/с;  $\rho$  – плотность газа,  $\text{кг/м}^3$ ;  $d$  – внутренний диаметр трубы, м;  $\mu$  – динамическая вязкость, Па·с.

При скорости потока газа  $44,21 \text{ м/с}$  число Рейнольдса:  $Re = 58933$ , развитое турбулентное течение.

4. Длина и внутренний диаметр трубы экспериментальной установки –  $L = 800$  мм,  $d = 20$  мм.

5. Материал трубопровода – сталь.

6. Массовая концентрация частиц в трубопроводе –  $0,08 - 1$ .

7. Подача льда с помощью эжектора. Массовый расход льда – от 3 до  $20 \text{ кг/ч}$ .

8. Необходимо измерение температуры в форбункере.

9. Необходимо измерять расход воздуха.

10. Взвешивать массу льда до начала и после эксперимента.

11. Мощность электронагревателя составляет  $2 \text{ кВт}$ .

### Порядок проведения эксперимента

Подготовительная часть работы (настройка коэффициента эжекции и степени сжатия).

1. Открыть вентиль на баллоне, при закрытом вентиле редуктора.

2. Рукояткой редуктора выставить необходимое давление, ориентируясь по выходному манометру редуктора.

3. Установить необходимое расстояние от среза сопла до начала смесительного участка эжектора ( $L_c$ ).

*Примечание.* Коэффициент эжекции зависит в основном от расстояния ( $L_c$ ), а степень сжатия зависит от отношения площади сечения смесительного участка к площади критического сечения сопла.

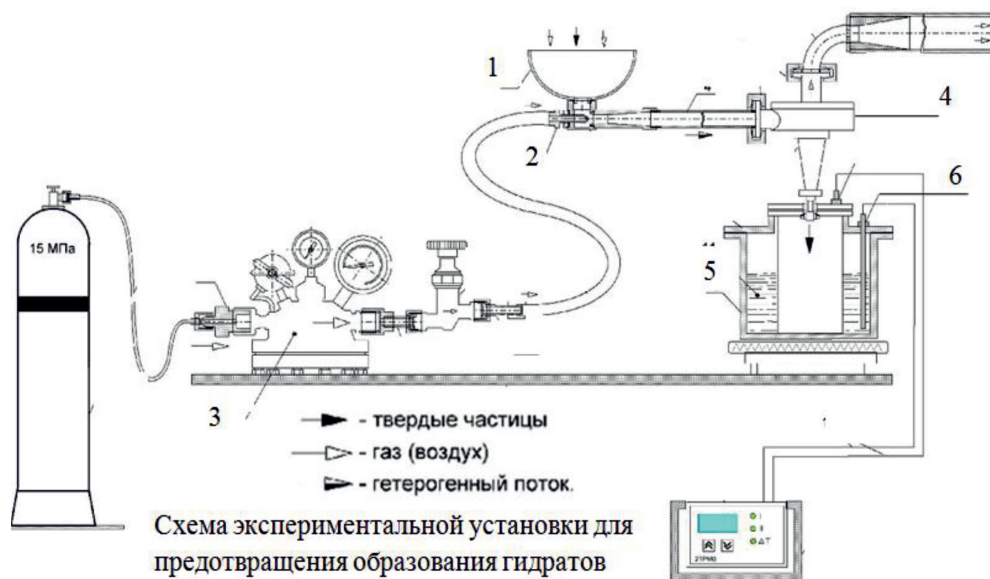


Рис. 2. Экспериментальный стенд улавливания гидратов: 1 – воронка приемная; 2 – эжектор; 3 – регулятор давления; 4 – циклон; 5 – форбункер; 6 – датчик температуры

4. Вращая сопло вправо или влево, уменьшают (Lc) или увеличивают, тем самым уменьшают или увеличивают коэффициент эжекции. Степень сжатия эжектора подбирается заменой сопла (прилагаются три варианта диаметра сопел 3 мм, 4 мм, 5 мм).

5. После установлении необходимого (Lc) затянуть контргайку.

**Исследовательская часть работы**

1. Включить измеритель температуры  
2. Включить электроплитку для подогрева форбункера циклона.

3. По достижении необходимой температуры подогревающей жидкости открыть вентиль и вручную осуществить подачу твердых частиц гидрата в приемную воронку, соблюдая необходимую концентрацию частиц в потоке воздуха.

4. По окончании опыта закрыть вентиль, закрыть вентиль баллона, выключить электропитание измерителя температуры и подогревателя.

*Примечание.* 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 находится средняя скорость по всему сечению трубы. По найденному значению средней скорости и площади сечения измерительной трубы вычисляется расход воздуха.

Максимальная скорость потока воздуха (м/с)

$$v_{\max} = \sqrt{\frac{2gP_{\Delta}}{\rho_b}}, \quad (1)$$

где  $P_{\Delta}$  – перепад давления измеренный трубкой Пито (мм. вод. ст.), размерность соответствует с размерностью  $\text{кг/м}^2$ ,  $\nu = 1,5 \cdot 10^{-5}$  кинематическая вязкость воздуха [8].

Для ориентировочной оценки потребляемого газа (воздуха) из баллонов приведена методика определения массового расхода воздуха при разных значениях давления воздуха перед соплом и различных диаметров сопла. Формула для расчета расхода сжатого газа в зависимости от диаметра отверстия и давления в сети:

$$G = f \times P_{\text{абс}} \times 10^5 \times 3600 \times \sqrt{k_p \times \left(\frac{2}{k_p + 1}\right)^{\frac{k_p + 1}{k_p - 1}} \times \frac{1}{RT_p}}, \quad (2)$$

где  $G$  – расход сжатого газа,  $\text{кг/час}$ ;  $f$  – площадь сопла,  $\text{м}^2$ ;  $P_{\text{абс}}$  – полное давление на сопле:  $P_{\text{абс}} = P_0 + P_{\text{изб}} = 1 + P_{\text{изб}}$ , где  $P_0$  – атмосферное давление в атм,  $P_{\text{изб}}$  – давление на манометре в атм;  $k_p$  – показатель адиабаты, для воздуха  $k_p = 1,4$ ;  $R$  – газовая постоянная, для воздуха  $R = 287 \text{ дж/кг} \times \text{град}$ ;  $T_p$  – температура газа в К,  $T_p = t^{\circ}\text{C} + 273$ .

Произведем расчет для проведения эксперимента при отверстии 5 мм и при избыточном 5 атм [8].

$$G = \frac{3,14 \times (5 \times 10^{-3})^2 \times 6 \times 10^5 \times 3600}{4} \sqrt{\frac{0,47}{287 \times 290}} \cong 101 \text{ кг/ч}.$$

В пересчете на нормальные  $\text{м}^3/\text{час}$  получается G:

$$\rho_{\text{газ}} = 101[\text{кг/ч}] : 1,23[\text{кг/м}^3] \approx 82 [\text{м}^3/\text{ч}],$$

где  $\rho_{\text{газ}} = 1,23[\text{кг/м}^3]$  – плотность воздуха при нормальных условиях.

Таблица расхода газа [9]

Давление атм	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Диаметр сопла, мм	1	2	3	3	4	5	5	6	7	7
	2	5	8	11	13	16	19	21	24	30
	3	12	18	24	30	36	42	48	54	66
	4	21	32	43	54	64	75	86	97	118
	5	34	50	67	84	101	117	134	151	185
	6	48	72	97	121	145	169	193	217	266
	7	66	99	132	164	197	230	263	296	362
	8	86	129	172	215	258	301	344	387	473
	9	109	163	217	272	326	381	435	489	598
	10	134	201	268	336	403	470	537	604	738
	11	162	244	325	406	487	568	650	731	893
	12	193	290	387	483	580	677	773	870	1063

Представим данные для расчета в таблице для аналогичных экспериментов.

### Выводы

В результате проведения работы по исследованию проблем образования гидратов и проблем очистки газа от механических примесей был предложен и изготовлен стенд для предотвращения гидратообразования гидроаэромеханическими методами. Исследования показали высокую эффективность предложенного метода. Были смоделированы различные реальные условия подготовки газа, разработана математическая модель процесса, а также начал разрабатываться программный комплекс для проведения расчетов для различных месторождений.

### Список литературы

1. Бухгалтер Э.Б. Метанол и его использование. – М.: Недра, 1986. – 240 с.
2. Ахмедов М.И. Технология очистки метанолсодержащих сточных вод нефтегазоконденсатных месторождений // Нефтяное хозяйство. – М., 2016. – № 5. – С. 106–108.
3. Кутепов А.М., Терновский И.Г., Кузнецов А.А. Гидродинамика и гидроциклон // Журнал прикладной физики. – 2008. – № 12. – С. 145–149.
4. Мурзагулов В.Р. Совершенствование эксплуатации добывающих скважин и нефтегазовых шлейфов в условиях образования парафиногидратных отложений: на примере Ямбургского газоконденсатного месторождения: дис. ... канд. тех. наук: 25.00.17 / Мурзагулов Венер Рифкатович; [Место защиты: Ин-т проблем трансп. энергоресурсов]. – Уфа, 2011. – 119 с.
5. Мансуров Р.И., Брил Д.М., Эмков А.А. Основные направления развития технологий и технологии очистки нефти и воды на месторождениях // Нефтяная промышленность. – М., 2009. – № 9. – С. 54–62.
6. Тимербаев А.С. Исследование физико-химического метода очистки воды для систем поддержания пластового давления с использованием центробежного сепаратора с рабочим колесом // Новые технологии – нефтегазовый регион. – 2012. – ч. 2. – 284 с.

7. Гуандун Г., Сонгшэн Д. Исследование разрыва дисперсных масел и эмульсификация в динамическом гидроциклоне нефти и воды // Науки и технологии. – 2013. – № 5. – С. 1110–1116.

8. ВРД 39-1.13-010-2000. Инструкции по расчету норм потребления метанола для использования при расчете предельно допустимых или временно согласованных сбросов метанола для объектов «Газпрома». Публ. МРТ «Газпром». – 2000. – 17 с.

9. Тимербаев А.С., Таранова Л.В. Численное моделирование разделения масляно-водной эмульсии в центробежном сепараторе // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 9-3. – С. 547–551.

### References

1. Buhgalter Je.B. Metanol i ego ispolzovanie. M.: Nedra, 1986. 240 p.
2. Ahmedov M.I. Tehnologija ochistki metanolsoderzhashih stochnyh vod neftegazokondensatnyh mestorozhdenij // Neftjanoe hozjajstvo. M., 2016. no. 5. pp. 106–108.
3. Kutepov A.M., Ternovskij I.G., Kuznecov A.A. Gidrodinamika i gidrociklon // Zhurnal prikladnoj fiziki. 2008. no. 12. pp. 145–149.
4. Murzagulov V.R. Sovershenstvovanie jekspluatacii dobyvajushih skvazhin i neftegazovyh shlejfov v uslovijah obrazovaniya parafinogidratnyh otlozhenij: na primere Jamburgskogo gazokondensatnogo mestorozhdenija: dis. ... kand. teh. nauk: 25.00.17 / Murzagulov Vener Rifikatovich; [Mesto zashhity: In-t problem transp. jenergoresursov]. Ufa, 2011. 119 p.
5. Mansurov R.I., Bril D.M., Jemkov A.A. Osnovnye napravlenija razvitija tehnologij i tehnologii ochistki nefiti i vody na mestorozhdenijah // Neftjanaja promyshlennost. M., 2009. no. 9. pp. 54–62.
6. Timerbaev A.S. Issledovanie fiziko-himicheskogo metoda ochistki vody dlja sistem podderzhanija plastovogo davlenija s ispolzovaniem centrobezhnogo separatora s rabochim koleksom // Novye tehnologii neftegazovyj region. 2012. ch. 2. 284 p.
7. Guandun G., Songshjen D. Issledovanie razryva dispersnyh masel i jemulsifikacija v dinamicheskom gidrociklone nefiti i vody // Nauki i tehnologii. 2013. no. 5. pp. 1110–1116.
8. VRD 39-1.13-010-2000. Instrukcii po raschetu norm potreblenija metanola dlja ispolzovanija pri raschete predelno dopustimyh ili vremenno soglasovannyh sbrosov metanola dlja obektov «Gazproma». Publ. MRT «Gazprom». 2000. 17 p.
9. Timerbaev A.S., Taranova L.V. Chislennoe modelirovanie razdelenija masljano-vodnoj jemulsii v centrobezhnom separatore // Fundamentalnye issledovanija. 2014. no. 9-3. pp. 547–551.