

М.А. Фатыхов, Н.Я. Багаутдинов

УСТАНОВКА ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ДИНАМИКИ РАЗЛОЖЕНИЯ ГАЗОГИДРАТА В ТРУБЕ ПРИ СВЧ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

*Башкирский государственный педагогический университет,
ул. Октябрьской революции, 3, Уфа-центр, 450000, Башкортостан, Россия*

При добыче, сборе, подготовке и промышленной обработке газа и нефти наблюдается образование газогидратов в различных участках трубопроводов [1, 2]. В таких случаях разрушение газогидратов обычными методами зачастую затруднительно.

В отечественной и зарубежной практике до настоящего времени не найдено универсального метода борьбы с парафино- и газогидратами в скважинах и трубопроводах. Это связано, прежде всего, с многообразием причин, обуславливающих образование парафино- и газогидратов в процессе добычи нефти и газа, и многообразием конструкций скважин и трубопроводов. В реальных условиях для ликвидации образовавшихся пробок необходимо снизить давление при постоянной температуре или повысить температуру выше температуры разложения гидрата или выпадения парафина, либо ввести в скважину веществ, разлагающих пробки.

В отношении электрических свойств парафино- и газогидраты представляют собой диэлектрик с потерями, который характеризуется комплексной относительной диэлектрической проницаемостью [3]

$$\epsilon(\omega, T, P) = [\epsilon'(\omega, T, P) - j\epsilon''(\omega, T, P)], j = \sqrt{-1}. \quad (1)$$

Мнимая часть диэлектрической проницаемости, как известно, определяет плотность источников тепла, возникающих в материале при его взаимодействии с высокочастотным электромагнитным полем, в соответствии с выражением

$$q = \omega \epsilon' \epsilon_0 \operatorname{tg} \delta \cdot E^2, \operatorname{tg} \delta = \frac{\epsilon''}{\epsilon'}. \quad (2)$$

В формулах (1) и (2) ω – циклическая частота, рад/с; ϵ' , ϵ'' – относительная диэлектрическая проницаемость и фактор потерь соответственно, T – температура, °С; P – давление, Па; ϵ_0 – диэлектрическая постоянная, Ф/м; $\operatorname{tg} \delta$ – тангенс угла диэлектрических потерь, E – напряженность электрического поля, В/м.

Возникновение внутренних источников тепла в таком диэлектрике при его взаимодействии с высокочастотным электромагнитным полем и, как следствие, изменение температуры и давления в нем, представляет физическую основу метода разложения парафино- и газогидратных пробок, образующихся в различных узлах нефтегазопромыслового оборудования, с применением энергии высокочастотного электромагнитного поля. Одним из преимуществ данного метода является также выделение дополнительного тепла в материале узлов нефтегазопромыслового оборудования вследствие конечной проводимости.

Несмотря на достоинства рассматриваемого метода, изучение доступной литературы показывает, что проблемы, связанные с разложением газогидрата в электромагнитном поле, совершенно не изучены экспериментально.

В связи с этим рассмотрим возможность разложения гидрата воздействием СВЧ излучения, рассматривая трубопровод как некий круглый волновод [4–6].

Для исследования особенностей разложения газогидрата в трубопроводе при воздействии СВЧ

электромагнитного поля была разработана экспериментальная установка, блок-схема которой приведена на рис.1. СВЧ электромагнитная энергия в модель трубопровода 1 вводится медным штырем 14, соединенным прямоугольным волноводом генератора 2 с помощью коаксиально-волноводного перехода. Энергия от прямоугольного волновода снимается также с помощью штыря. Источником СВЧ энергии является СВЧ генератор типа «Парус».

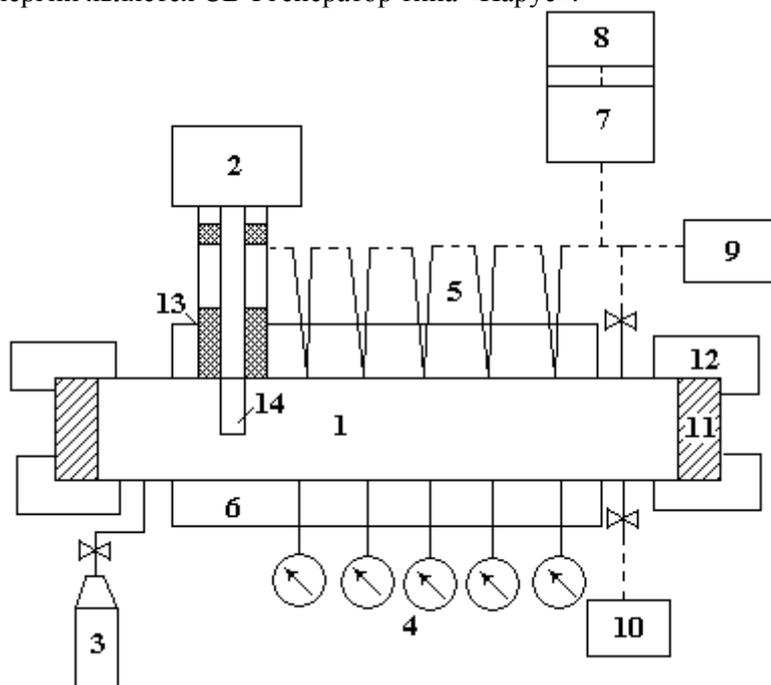


Рис.1. Блок-схема экспериментальной установки

Разрушение газогидрата в трубопроводе, который в электродинамическом отношении представляет собой круглый волновод, возможно только при возбуждении в нем электромагнитного поля соответствующей конфигурации. Основным типом волны в круглом волноводе является волна типа H_{11} [4–6]. Этот тип волны распространяется в нем с наименьшими потерями, что является одним из требований применения СВЧ энергии с целью разрушения газогидрата большой толщины в трубопроводе.

В круглом волноводе электромагнитная волна может распространяться лишь в том случае, если рабочая частота источника электромагнитной энергии удовлетворяет условию $f > f_{кр}$, или $\lambda < \lambda_{кр}$ [4, 7]. В данном эксперименте $f = 2375$ МГц. Поэтому радиус трубопровода a для возбуждения в нем волны типа H_{11} находится в пределах $0,036 < a < 0,048$ м.

В разработанной установке радиус модели трубопровода составляет 4 см, что удовлетворяет этому неравенству. Для модели трубопровода критическая частота для волны H_{11} по известным формулам [4, 7] равна 2,2 ГГц. Следовательно, условие $f > f_{кр}$ выполняется.

Чтобы обеспечить измерения температуры вдоль модели трубопровода и одновременно давления, длина волновода принята равной четырем длинам электромагнитной волны в воздухе. Учтено также количество газа, которое необходимо для заполнения модели. Поскольку концы волновода прозрачны для СВЧ электромагнитной волны, необходимо, чтобы излучение в окружающее пространство было минимально или вообще отсутствовало. Для этого рассчитывалось значение выражения

$$P(z)/P_0 = e^{-2\alpha z},$$

где $P(z)$ – мощность электромагнитного поля в сечении z трубопровода, Вт; P_0 – мощность электромагнитного поля в точке ввода СВЧ энергии в трубопровод, Вт; α – коэффициент поглощения СВЧ электромагнитной волны, m^{-1} . Для того, чтобы экспериментальная установка была безопасна, необходимо обеспечить убывание мощности электромагнитного поля вдоль модели трубопровода более чем в $e = 2,73\dots$ раз.

Для расчета коэффициента поглощения α СВЧ электромагнитной волны в трубе с воздушным заполнителем, воспользовались выражением $\alpha = \alpha_d + \alpha_m$, где α_d – коэффициент затухания электромагнитных волн в газогидрате, m^{-1} ; α_m – коэффициент затухания электромагнитных волн в материале трубопровода, m^{-1} . Эти коэффициенты рассчитывали по формулам работ [4, 7]. При

рабочей частоте $f = 2375$ МГц, электропроводности материала трубы $\sigma = 0,34 \cdot 10^7$ Ом⁻¹ м⁻¹ и его магнитной проницаемости $\mu = 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 2,72$ Гн/м [8], относительной диэлектрической проницаемости гидрата пропана $\epsilon' = 3,75$, его тангенсе угла диэлектрических потерь $\text{tg}\delta = 0,02$ [3] получили $\alpha = 2,15$ м⁻¹. При этих условиях энергия электромагнитного поля не выходит за пределы трубы, что важно при проведении экспериментов, связанных с использованием СВЧ энергии.

Следует заметить, что потери электромагнитной энергии в трубе существенно зависят от диэлектрических свойств газогидрата. Некоторые результаты исследований представлены в [3], остальные данные могут быть получены в дальнейшем.

Контрольно-измерительные приборы включают манометры 4 и термометры 5. На боковой поверхности цилиндра приварены штуцера для манометров и термометров. Концы термометров опущены через штуцера в модель трубопровода 1 на уровне его внутренней поверхности. Термометры подключены к милливольтметру 8 через распределитель 7. Для поддержания определенной температуры в модели трубопровода используется терморубашка 6, которая с помощью штуцеров соединяется с термостатом. Торцевые части модели трубопровода изготовлены из оргстекла 11 и герметизированы крышками 12, что необходимо для визуального наблюдения за образованием и разрушением газовых гидратов.

Рабочий объем цилиндра составляет 30 дм³. Для герметизации в точке ввода СВЧ электромагнитной волны применен фторопластовый уплотнитель 13. Внешний и внутренний электроды коаксиальной линии разделены фторопластовыми шайбами. До образования газогидрата модель заполняется газом из баллона 3. Объем газа, который выходит из модели при разрушении газогидрата, измеряется расходомером 9. Для подачи воды в модель трубопровода применен краник 10. Для создания СВЧ энергии в трубопроводе применен штыревой излучатель 14, который выступает от внутренней поверхности трубы на длину, равную четверти длины электромагнитной волны в воздухе.

Методика эксперимента заключалась в следующем:

1. Исследование термогидродинамических особенностей, возникающих при плавлении льда в СВЧ поле.
2. Отработка методики получения газогидрата в модели трубопровода.
3. Исследование особенностей разложения газогидрата в трубопроводе при СВЧ электромагнитном воздействии.

Предварительная опрессовка модели показала ее работоспособность до давлений 9,5–10,0 МПа.

На основе методики проведено 10 серий экспериментов.

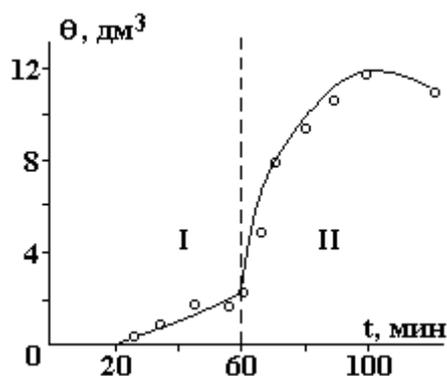


Рис. 2. Скорость плавления льда: I – при комнатной температуре, II – при СВЧ воздействии

Первая серия экспериментов заключалась в определении эффекта влияния СВЧ электромагнитного поля на скорость плавления льда. Для этого проводились исследования объема воды, выходящей из трубопровода без СВЧ воздействия, то есть при комнатной температуре 22 °С. Наблюдения показали, что вода на выходе из трубы появилась через 17–18 мин. Как видно из рис. 2 (область I), при отсутствии СВЧ воздействия расход воды из трубы не превышал 2–3 мл/мин. После этого в модели трубопровода создавалось СВЧ электромагнитное воздействие в соответствии с блок-схемой, рис.1. Мощность СВЧ энергии, подводимой к входу модели, рассчитывалось по формуле

$$\Delta P = P_{\text{ол}} - P_{\text{л}} = 0,07CV [(T_2 - T_1) - (T_3 - T_1)],$$

где $P_{\text{бл}}$ – мощность электромагнитного поля в волноводе СВЧ генератора без соединения с экспериментальной установкой, Вт; $P_{\text{л}}$ – мощность электромагнитного поля при соединении экспериментальной установки, Вт; C – теплоемкость воды, $^{\circ}\text{C}$; V – объемный расход воды, $\text{м}^3/\text{с}$; T_2 – температура выходящей воды без соединения экспериментальной установки, $^{\circ}\text{C}$; T_1 – температура воды на выходе в волноводе, $^{\circ}\text{C}$; T_3 – температура воды на выходе при соединении экспериментальной установки к волноводу, $^{\circ}\text{C}$.

По результатам измерений: $T_2 = 17,1^{\circ}\text{C}$; $T_3 = 12^{\circ}\text{C}$; $T_1 = 7,7^{\circ}\text{C}$. Поэтому мощность электромагнитного поля, отбираемая от СВЧ генератора, составила $P = 257 \pm 1$ Вт. Как видно из рис. 2 (область II), при СВЧ электромагнитном воздействии, объем воды, вытекающей из трубопровода, резко возрастает, следовательно, увеличивается скорость таяния льда в СВЧ электромагнитном поле. При этом расход воды, вытекающей из модели трубопровода, достигает $12 \text{ дм}^3/\text{мин}$. Это показывает, что скорость таяния льда увеличилась в 5–6 раз по сравнению с естественным расплавлением льда. При дальнейшем воздействии СВЧ электромагнитным полем наблюдается некоторый спад объема воды, вытекающей из модели, что обуславливается нелинейным характером изменения температуры в модели.

В дальнейшем отработывались методика получения газогидрата и были исследованы особенности разложения его в модели трубопровода при СВЧ электромагнитном воздействии, которым были посвящены остальные девять серий экспериментов.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Истомин В.А.* Предупреждение и ликвидация газовых гидратов в системах сбора и промышленной обработки газа и нефти. М., 1990.
2. *Blanc C., Tournieer-Lasserve J.* Controlling hydrates in high-pressure flow lines // *World Oil*, 1990, XI, vol 211, №5, p. 63, 65, 66, 68.
3. *Фатыхов М.А., Саяхов Ф.Л., Макогон Ю.Ф.* Результаты исследования диэлектрических свойств газогидрата пропана // *Экспресс-информация: Подготовка, переработка и использование газа*. М., 1989. № 3. С. 3–5.
4. *Ширман Я.Д.* Радиоволноводы и объемные резонаторы. М., 1959.
5. *Стрэттон Дж.А.* Теория электромагнетизма. М.–Л., 1948.
6. *Вольман В.Н., Пименов Ю.В.* Техническая электродинамика. М., 1971.
7. *Рамо С., Уиннери Дж.* Поля и волны в современной радиотехнике. М.–Л., 1950.
8. *Саяхов Ф.Л., Бабалян Г.А., Чистяков С.И.* О высокочастотном нагреве призабойной зоны скважин // *Нефтяное хозяйство*. 1970. № 10. С. 49–52.

Поступила 13.04.04

Summary

The experimental installation is depicted and the outcomes of studies of fusion of ice in a superhigh-frequency electromagnetic field created in the pipe line are reduced. The given installation can be used as for study of breaking down of a gaseous hydrate in an electromagnetic field.