

Запись вводного вебинара доступна по ссылке: [GO TO WEBINAR](#).

## Содержание

<b>1</b>	<b>Введение</b>	<b>2</b>
----------	-----------------	----------

# Газовые гидраты

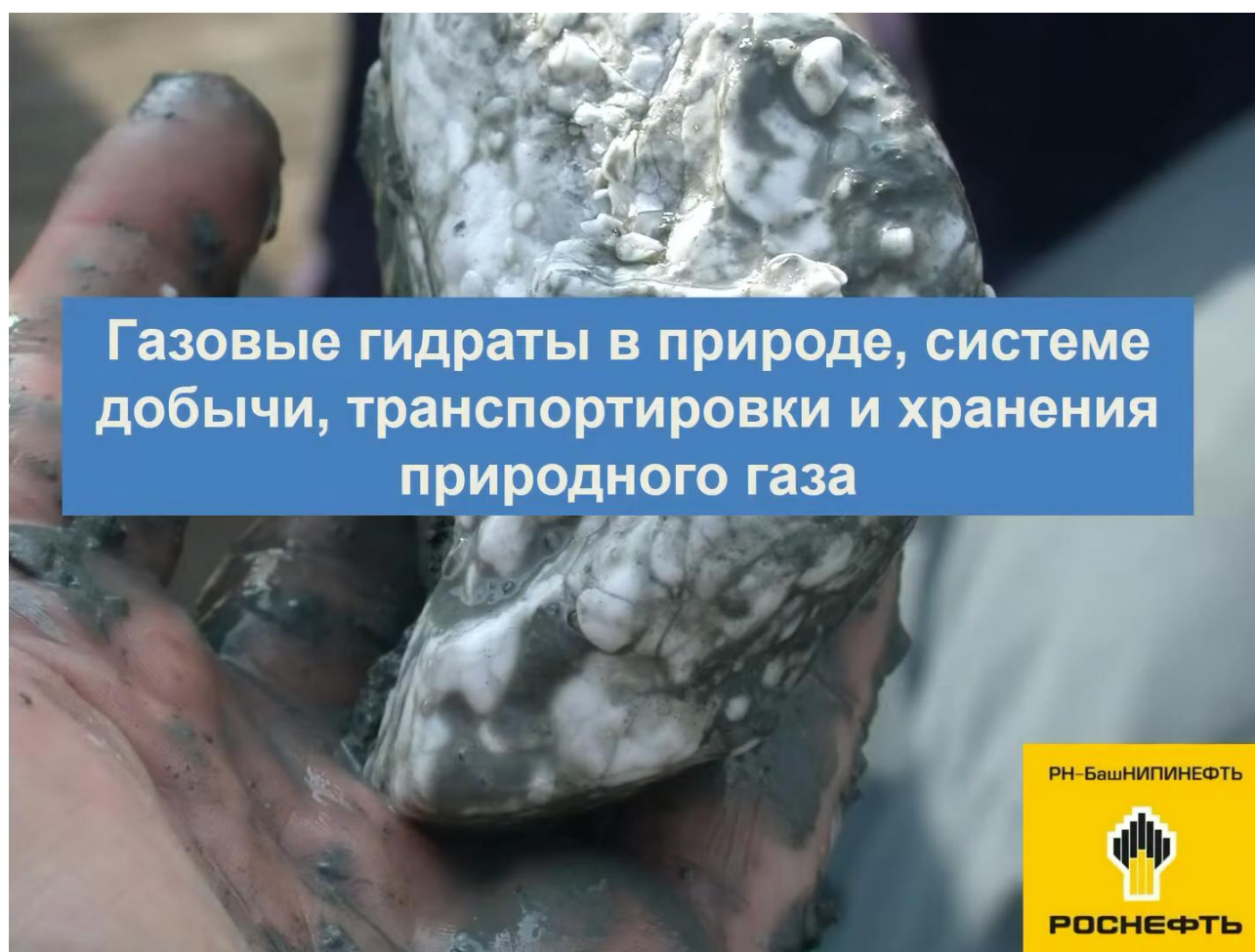
## Конспект лекций и семинаров

Муравцев А.А.<sup>1</sup>

Чиглинцева А.С.<sup>2</sup>

12 апреля 2023 г.

### 1 Введение



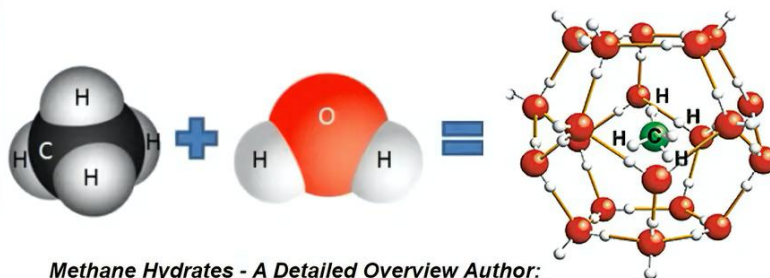
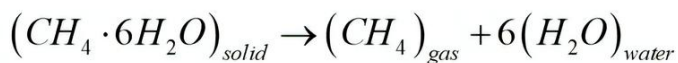
<sup>1</sup>конспектирует; email: [almuravcev@yandex.ru](mailto:almuravcev@yandex.ru)

<sup>2</sup>лектор, доктор физико-математических наук, доцент, главный специалист отдела гидродинамических исследований скважин ООО «РН-БашНИПИНефть»

## Газогидраты



Ocean hydrates at the Barkley Canyon off the coast from Vancouver, CANADA.



Methane Hydrates - A Detailed Overview Author: Christie Marbbn, March 11, 2009



Газогидрат оз. Байкал

Потенциальные ресурсы газа в газогидратах

$$1.5 \cdot 10^{16} \text{ м}^3$$

массовое содержание метана в гидрате  $G = 0,11 - 0,13$

9 – 12 % поверхности Океана дают положительный прогноз для обнаружения газогидратов

Эффективно можем отбирать 17-20% -  $3 \cdot 10^{15} \text{ м}^3$

## Газогидраты

Твердое кристаллическое вещество, напоминающее снег или рыхлый лед

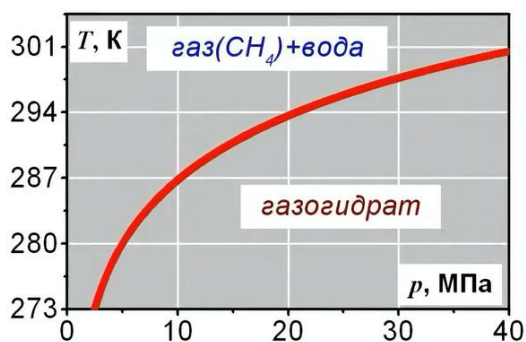
Плотность  $\rho_h^0 = 900 \text{ кг/м}^3$ ; массовое содержание метана  $k_g = 0,11$

Удельная теплота разложения  $l = 5 \cdot 10^5 \text{ Дж/кг}$

Зависимость температуры разложения от давления

$$T_s(p) = T_{s0} + T_* \ln(p/p_{s0})$$

( $T_{s0} = 273 \text{ K}$ ,  $p_{s0} = 2,5 \text{ МПа}$ ,  $T_* = 10 \text{ K}$  для газогидрата метана)



Фазовая диаграмма системы метан - вода



Газогидрат, оз. Байкал



**Молекулярная масса гидрата метана**

$$M(CH_4 \cdot 6H_2O) = 16 + 6 \cdot 18 = 124 (\text{г/моль})$$

Массовая концентрация газа в составе газогидрата

$$G_g = \frac{16}{124} = 0.13$$

$$G_g + G_l = 1$$

Массовая концентрация воды в составе газогидрата

$$G_l = \frac{108}{124} = 0.87$$

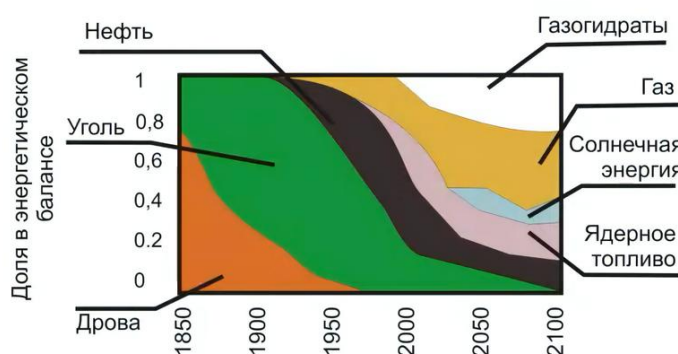
**Энергетическая выгода**

При разложении 1 кг газогидрата метана выделяется масса газа  $m_g = G m_h = 0.13 \cdot 1 = 0.13 (\text{кг})$

При сгорании данной массы газа выделяется количество теплоты  $Q_g = m_g q_{CH_4} = 0.13 \cdot 4 \cdot 10^7 = 5 \cdot 10^6 (\text{Дж})$

$$Q_h = m_h I_h = 5 \cdot 10^5 (\text{Дж})$$

На разложение гидрата метана требуется около 10% теплоты, выделяющейся при сгорании содержащегося в нем газа

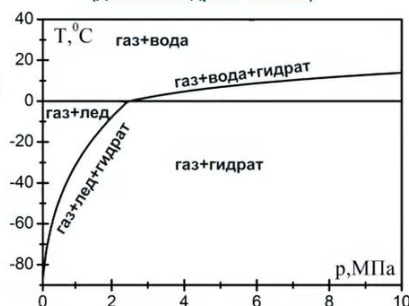
**Газогидратное состояние – удобное для хранения газа****Динамика мирового производства энергии****Условие фазового равновесия**

$$T_s(p) = T_{s0} + T_* \ln(p/p_{s0})$$

$$T_{s0} = 273 \text{ К}, p_{s0} = 2,56 \text{ МПа},$$

$$T_* \approx 10 \text{ К} (T > 0^\circ \text{C}), T_* \approx 30 \text{ К} (T < 0^\circ \text{C})$$

(для газогидрата метана)



Фазовая диаграмма газогидрата метана



Месторождения газогидратов

11

Треть суши, или **27%**, и более **90%** площади **Мирового океана** содержат газогидраты.



Ресурсы природного газа в гидратах суммарно континентальной и шельфовой областях **России** оцениваются **100-1000 трлн. м³**, причем на континентальной части России этих ресурсов не более **100 трлн. м³**.



Около **98%** ресурсов газогидратов находится в акваториях мирового океана (у побережий **Северной, Центральной и Южной Америки, Японии, Норвегии и Африки**, а также в **Каспийском и Черном морях**) на глубинах воды более **200-700 м**, и только **2%** – в приполярных частях материков.

Гидраты, насыщающие морские осадки, подняты из скважин в **Мексиканском заливе** и при глубоководном бурении в **Атлантическом и Тихом океанах**.

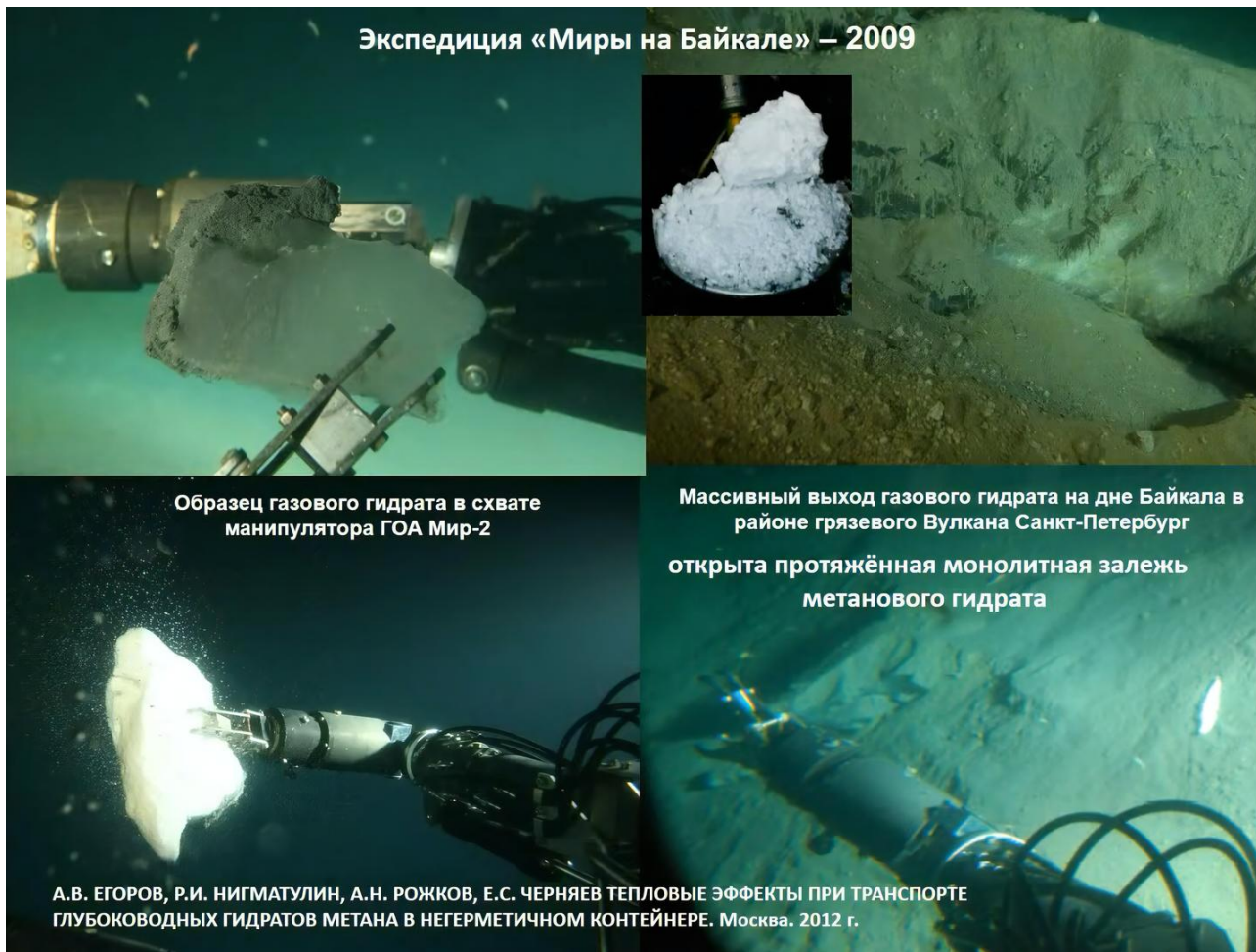
В **России** они подняты с осадками в **Черном, Каспийском, Охотском и Балтийском морях**, со дна озера **Байкал**.

Во многих районах Мирового Океана наличие газогидратных залежей обнаруживается от **нескольких десятков или сотен метров от дна**. На суше газогидраты залегают на глубинах **200—2000 м**, а в осадках дна их находят от поверхности до глубин **500—800 м**.

На суше **России** выявлены такие гидратопоявления, как **Ямбургское, Мессояхское и Бованенковское** месторождения, район алмазоносной трубки **Удачная**, а также золотоносные россыпи **Колымского района, Чукотки, Буреинского прогиба, Западная Якутия**. В России для гидратонакопления **благоприятно** около **30%** территории.



## Экспедиция «Миры на Байкале» – 2009



Образец газового гидрата в схвате манипулятора ГОА Мир-2

Массивный выход газового гидрата на дне Байкала в районе грязевого Вулкана Санкт-Петербург  
открыта протяжённая монокристаллическая залежь метанового гидрата

А.В. ЕГОРОВ, Р.И. НИГМАТУЛИН, А.Н. РОЖКОВ, Е.С. ЧЕРНЯЕВ ТЕПЛОВЫЕ ЭФФЕКТЫ ПРИ ТРАНСПОРТЕ ГЛУБОКОВОДНЫХ ГИДРАТОВ МЕТАНА В НЕГЕРМЕТИЧНОМ КОНТЕЙНЕРЕ. Москва. 2012 г.

## Естественные выходы пузырьков метана с морского дна



Грязевой вулкан ХААКОН МОСБИ (Норвежское море (Арктика))  
*Jean-Paul Foucher et al. Changes in seabed morphology, mud temperature and free gas venting at the Hekna Mosby mud volcano...*

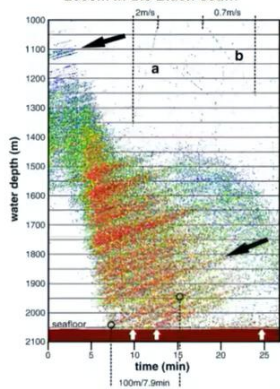


Аномальное выделение метана в морях Восточной Арктики

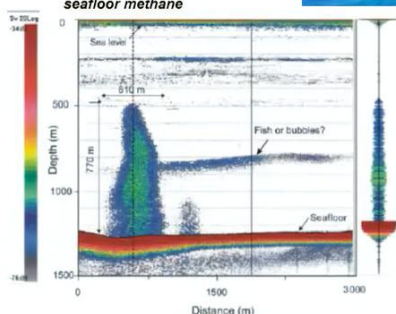


Macdonald I.R. Transfer of hydrocarbons from natural seeps ...  
Естественный выход газового пузыря в Мексиканском заливе. Пузыри газа выходят из газовых гидратов в воде на глубине 570 м

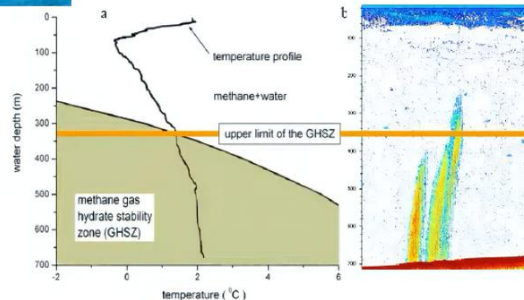
J. Greinert, Y. Artemov, V. Egorov, M. de Batist, D. McGinnis 1300-m-high rising bubbles from volcanoes at 2080m in the Black Sea...



Изображения газовых пузырьков, поднимающихся с морского дна (побережье Вашингтон). *Hannah Hickey Warmer Pacific Ocean could release millions of tons of seafloor methane*

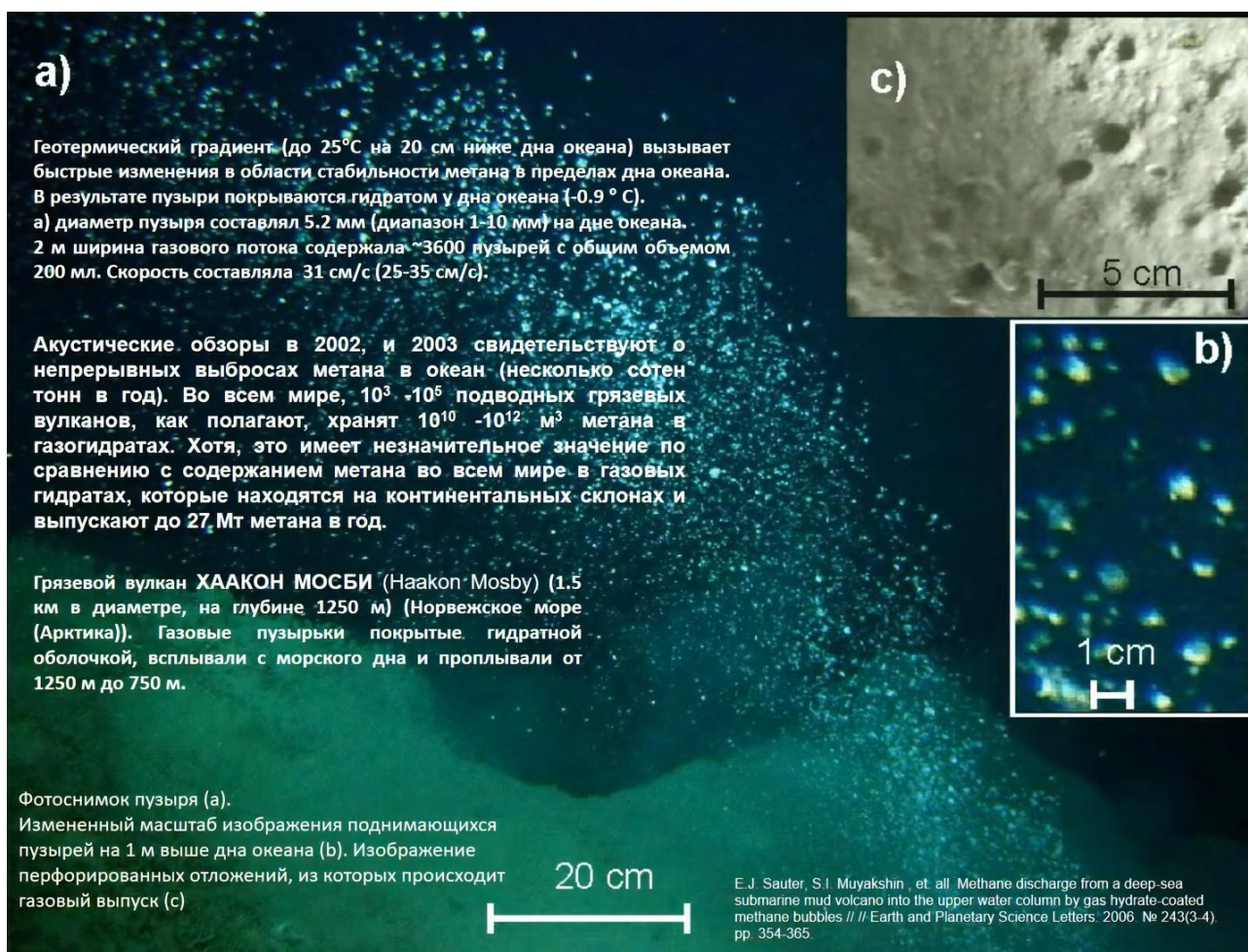


E.C. Willoughby, R.Mir, C. Scholl Neptune-Canada based geophysical imaging...



A.O. Maksimov, E.V. Sosedko Dynamics of sea bubbles ...  
Исследования на Сахалинском склоне в Охотском море обнаружили испускание пузырей газа метана с образованием гидрата.





### *Первый в мире проект синтеза гидрата в реакторах\**

Компания Mitsui Engineering & Shipbuilding (MES) **впервые** разработала концепцию транспортировки гидрата природного газа в форме гидратных гранул с целью простой и эффективной транспортировки природного газа в гидратном состоянии.



Гранулы гидрата при атмосферном давлении



Первая попытка MES была осуществлена в 2003 году в Японии с производительностью 600 кг в сутки. Испытательный блок в Тибе (Япония)



2005 год – вторая установка по производству гидрата смеси газов «Bench Scale Unit»



Завод по производству гидрата природного газа мощностью 5 тонн в сутки, встроенный в электростанцию (2009г.)



5-7,5 тонн



0,2 тонны

\*Nakai S. Development of Natural Gas Hydrate (NGH) Supply Chain // Proceedings, 25th World Gas Conference, Kuala Lumpur, Malaysia, 4-8 June, 2012 – 2012. –Vol. 4. – pp. 3040-3050.

Контейнер для гранул гидрата

16



## Образование гидрата метана и углекислого газа из ледяных частиц: теория и эксперимент

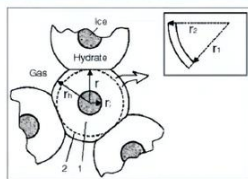
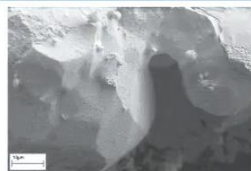


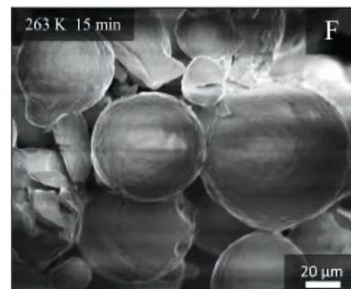
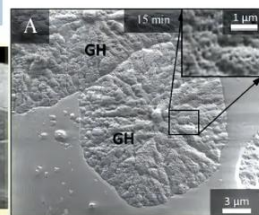
Схема роста гидратной оболочки вокруг сжимающегося ледяного ядра



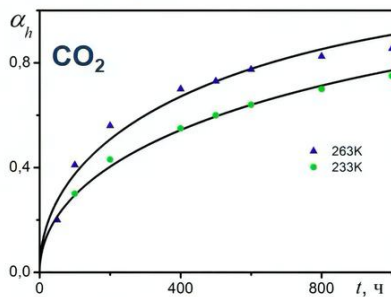
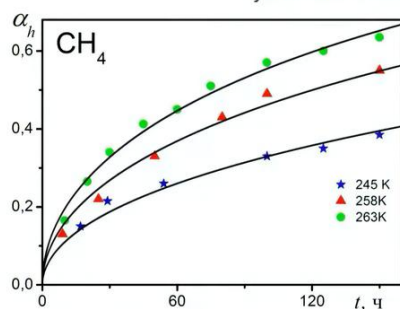
Изображения гидрата метана, полученного через 2 недели реакции при давлении 6 МПа и температуре 264 К. Кристаллы гидрата размером 20-30 мкм.



Образование гидратных участков на поверхности ледяных частиц



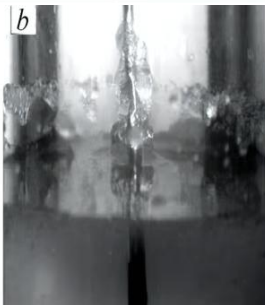
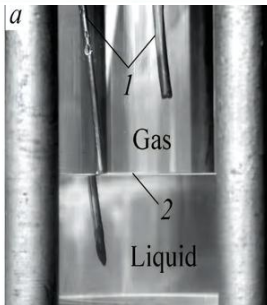
Изображения начальных гидратных пленок (углекислого газа) на поверхности ледяных частиц при температуре 263 К и давлении 0,9 МПа



Приведенный коэффициент диффузии метана в гидратном слое $D^*$ , м <sup>2</sup> /с		
$T$ , К (6 МПа)	Kuhs W.F., Staykova D.K., Salamatin A.N.	Шаганов В.Ш., Чиглинцева А.С.
245	$4 \cdot 10^{-17}$	$3.1 \cdot 10^{-17}$
258	$2.7 \cdot 10^{-16}$	$7 \cdot 10^{-17}$
263	$5.8 \cdot 10^{-16}$	$1.1 \cdot 10^{-16}$

Приведенный коэффициент диффузии углекислого газа в гидратном слое $D^*$ , м <sup>2</sup> /с		
$T$ , К ( $p$ , МПа)	Falenty A., Salamatin A.N., Kuhs W.F.	Шаганов В.Ш., Чиглинцева А.С.
263 (0.9)	$(3.7-4.4) \cdot 10^{-16}$	$3.2 \cdot 10^{-16}$
233 (0.5)	$(7.1-7.4) \cdot 10^{-17}$	$3 \cdot 10^{-16}$

17



Последовательные стадии роста гидратов из раствора ПАВ в воде: а – исходная система; б – начало образования и роста гидратов на стенках реактора и кармане термопары; с – рост гидратов на стенках реактора; d – полное превращение воды (90 - 100 %) в гидрат.



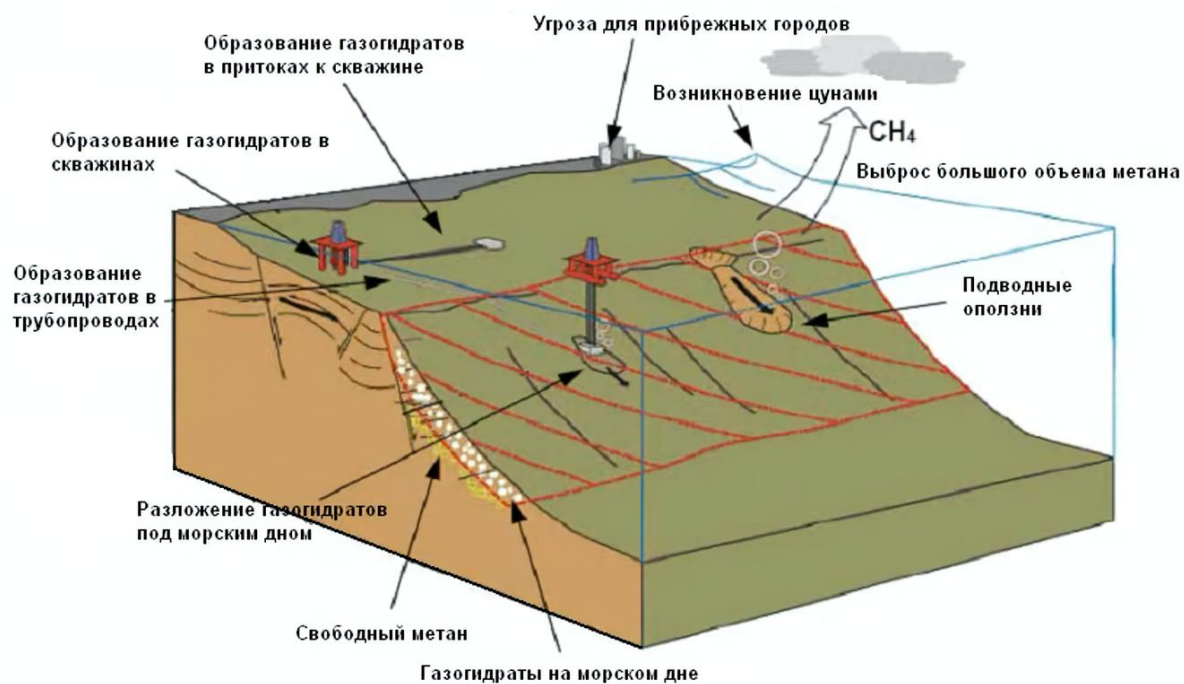
Рост гидратной шапки на торцевой поверхности песчаной засыпки и фильтрация влаги к фронту гидратообразования







## Различные проблемы, имеющие отношение к извлечению газогидратов



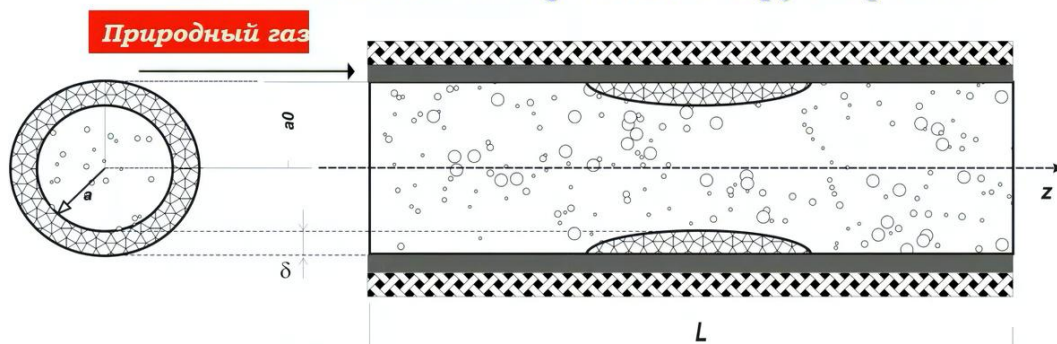
Гидраты природного газа, полученные в лабораторных условиях



Удаление гидратной пробки (Petrobras, Макогон)

# «Склероз» газопровода из-за отложения газогидратов

## Схематическое изображение трубопровода



$L$  – длина рассматриваемого трубопровода,  $a_0$  – внутренний радиус,  $a_1$  – внешний радиус,  $a$  – внутренний радиус при наличии гидратного слоя,  $\delta$  – толщина гидратного слоя



Взрыв нефтяной платформы Deepwater Horizon

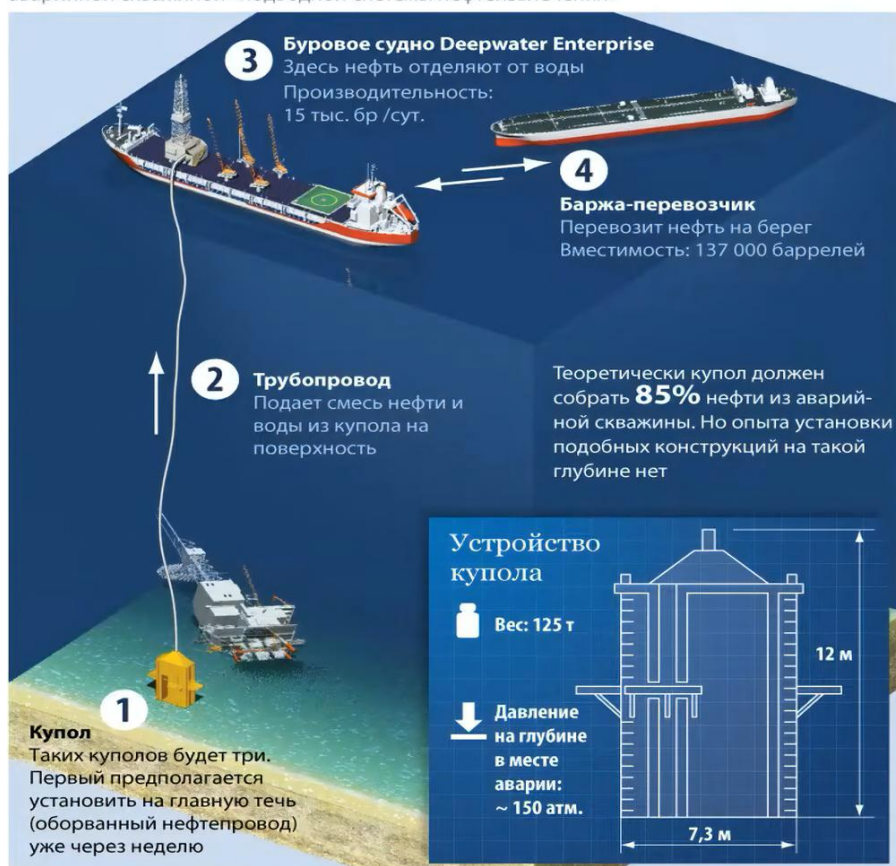
**20 апреля 2010 года** в Мексиканском заливе на буровой платформе **Deepwater Horizon** нефтегазовой компании **British Petroleum** произошла авария. Погибли 11 человек, платформа уничтожена пожара-ром, произошел неконтролируемый выброс нефти с глубины **1500 м.**





## Подводный купол в Мексиканском заливе

Компания BP надеется решить проблему разлива нефти с помощью установки над аварийной скважиной «подводной системы нефтеизвлечения»



Британская нефтяная компания BP заявила о проведении работ по переустановке защитного купола, временно удаленного по техническим причинам и предназначенного для откачки нефти, вытекающей из аварийной скважины.

Причиной временной приостановки откачки нефти и снятия защитного купола стал подводный робот, столкнувшийся с куполом и повредивший систему подачи теплой воды для предупреждения образования на нем льдоподобных кристаллов – гидратов метана.

# СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!

Фрагмент метанового гидрата оз. Байкал,  
Нигматулин Р.И., Егоров А.В. и др. Тепловые эффекты...

