



# ГАЗОВАЯ ПРОМЫШЛЕННОСТЬ

ОСОБЕННОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ  
МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПРИРОДНЫХ ГАЗОВ  
В ЗОНЕ ВЕЧНОЙ МЕРЗЛОТЫ.

Ю. Ф. Макогон

ОСОБЕННОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ  
МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПРИРОДНЫХ ГАЗОВ  
В ЗОНЕ ВЕЧНОЙ МЕРЗЛОТЫ

Центр научно-технической информации  
Министерства газовой промышленности  
Москва 1966

В данной брошюре рассматриваются условия образования гидратов природных газов в пористой среде, которые могут иметь место в зоне вечной мерзлоты.

В работе предложена методика подсчета запасов природных газов в залежах, содержащих гидраты.

Рассмотрены также условия разложения гидратов в пористой среде и рекомендованы принципы разработки гидратных месторождений природных газов.

Работа представляет особый интерес в связи с огромными перспективами <sup>в</sup> залежей <sup>в</sup> газа самим природного газа в северных районах СССР.

## РАЗМЕЩЕНИЕ ЗАЛЕЖЕЙ, СОДЕРЖАЩИХ ПРИРОДНЫЙ ГАЗ В ПЛАСТЕ В ВИДЕ ГИДРАТОВ

Вечная мерзлота в СССР распространена на территории Иркутской, Магаданской, Читинской, Омской, Новосибирской, Тюменской, Томской, Свердловской областей, Ухтинского района Коми АССР, Хабаровского и Красноярского края, Якутской и Бурятской автономных республик [1], она занимает 10 млн. км<sup>2</sup>, или почти 47% всей площади страны.

До последнего времени считалось, что слой вечной мерзлоты ограничивается глубиной 600-700 м, однако бурением и обследованием теплового режима Маркисской скважины, расположенной на северо-западе Якутской АССР, доказано существование многолетнемерзлых пород на глубине около 1400 м. На глубине 1800 м пластовая температура в этой скважине составила 3,8°C /рис. I/.

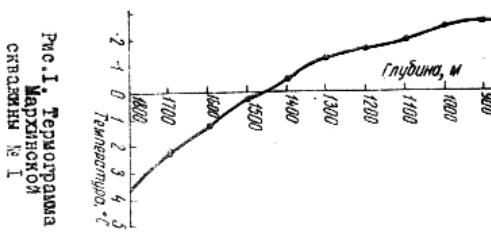


Рис. I. Температура скважины № 1

х) По данным Якутского территориального геологического управления.

В районах вечной мерзлоты находятся огромные запасы нефти и природных газов. В Западной и Восточной Сибири уже открыты перспективные газоносные районы с прогнозными запасами, превышающими 10 трил. м<sup>3</sup>. В связи с этим месторождения природных газов могут быть приурочены к зонам с многолетнемерзлых грунтов. На рис. 2 изображены изотермы распространения зон многолетней мерзлоты [2] на различной глубине. Линия М-М' показывает глубину распространения многолетнемерзлых грунтов.

На рис. 2 изображены изотермы распространения зон многолетней мерзлоты [2] на различной глубине. Линия М-М' показывает глубину распространения многолетнемерзлых грунтов.

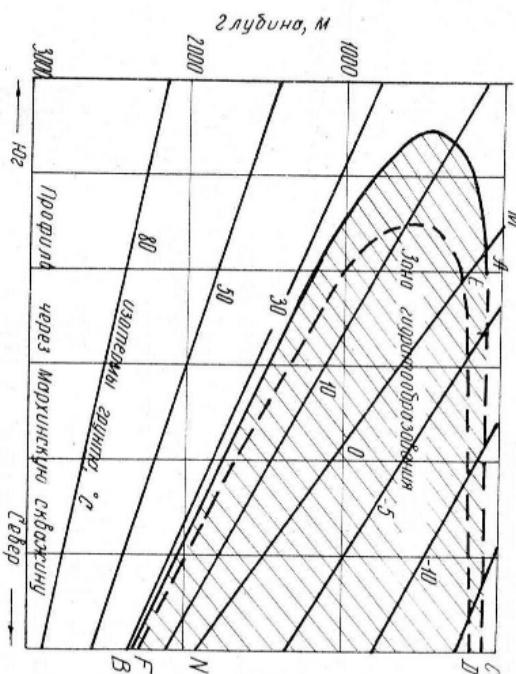


Рис. 2. Схема распространения зон гидратообразования при наличии вечной мерзлоты

Исходя из гидростатического распределения давления, в зависимости от глубины кривая АВ отображает равновесные условия образования гидратов природных газов с относительной плотностью по воздуху 0,6. Зона, ограниченная этой кривой, характеризует величину давления и температур, при которых природный газ в пласте представлен в виде гидратов. Даже в области, расположенной выше изотермы 0°C, природные газы

находятся в виде гидратов, а не в свободном состоянии в контакте со льдом, так как газовые залежи сформировались значительно раньше, чем распространилась вглубь многолетняя мерзлота.

При снижении температуры в залежи ниже 0°C вода в гидрате в лед не переходит.

На карте СССР (рис. 3) показана южная граница распространения вечной мерзлоты, а также область возможного расположения месторождений, где природный газ находится в виде гидратов. Эта область ограничена геоизотермой 0°C на глубине 100 м, на которой она совпадает с равновесной температурой образования гидратов природных газов с плотностью по воздуху 0,6 при пластовом давлении 10 ат (соответствующем гидростатическому).

Нижне изотерма 0°C гидраты природных газов образуются в пласте и граница их распространения определяется по кривой АВ (см. рис. 2). При проведении геофизических исследований залежей необходимо учитывать, что газ в зоне гидратообразования находится полностью или частично в связанном (твердом) состоянии.

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАПАСОВ ГАЗА В ЗАЛЕЖАХ, ПРИУРОЧЕННЫХ К ЗОНАМ ВЕЧНОЙ МЕРЗЛОТЫ

В гидратном месторождении газ может быть в виде гидратов и в свободном состоянии. Соотношение определяется различными факторами: пористостью, количеством связанной воды в поровом пространстве, составом газа, наличием миграции газа при образовании гидратов в залежи и т. д.

При образовании гидратов в пласте часть газа переходит в гидрат и, если газовая линия контакт подвижна, объем залежи значительно сокращается, так как при формировании гидратов 1 м<sup>3</sup> поровой воды способен связать от 71,1 до 215,7 м<sup>3</sup> газа. Если первоначальный газовый контакт не подвижен, то образование гидратов сопровождается снижением

давления газа в пласте. При наличии неподвижного газоводяного контакта могут быть вскрыты залежи природного газа с аномально низким давлением. При проводке скважин на таких структурах возможно большое поглощение промыльной жидкости. Уменьшение объема залежи или пластового давления газа необходимо учитывать при определении запасов природного топлива в гидратном месторождении, так как они могут значительно превышать данные, соответствующие показателям давления и объема залежи.

Запасы в месторождениях, содержащих газ частично или полностью в состоянии гидратов, рассчитываются по уравнению

$$Q_r = V_r \cdot m_3' \frac{P_{n\alpha} \cdot 273}{ZT} + V_r \cdot m_S \cdot S_p \cdot \psi \quad (1)$$

где  $V_r$  – объем залежи после перехода ее в гидратное состояние, м<sup>3</sup>;  $m_3'$  – эффективная пористость пласта с газом в виде гидрата;  $m$  – пористость в долях единицы;  $S_p$  – количество прореагированной воды (перешедшей в гидрат);  $P_{n\alpha}$  – пластовое давление, ат;  $Z$  – коэффициент сверхсжимаемости газа в пластовых условиях;  $T$  – температура пласта, °C;  $\psi$  – коэффициент реагирования, равен количеству обесцвеченного газа (при нормальных условиях), содержащегося в одном объеме воды при переходе их в гидрат.

$$\psi = \frac{22,4 \cdot 1000}{M_r} \text{ м}^3/\text{м}^3, \quad (2)$$

где  $M_r$  – молярный вес гидрата в пластовых условиях (для  $C_4H_10 \frac{M_r}{M_3'} = 119,5$ ; для  $C_2H_6 \frac{M_r}{M_3'} = 133,5$ ; для  $C_3H_8 \frac{M_r}{M_3'} = 350$ ; для  $C_4H_10 \frac{M_r}{M_3'} = 364$ ). Если при образовании гидратов в пласте или после перехода залежи в гидратное состояние миграции газа отсутствует, часть его будет в свободном состоянии. Объем свободно-

го газа в этом случае рассчитывается по уравнению

$$Q_r^{cs} = V_r \cdot m_3' \frac{P_{n\alpha} \cdot 273}{ZT} \text{ м}^3, \quad (3)$$

а объем газа, связанного водой, по формуле

$$Q_r^{T\beta} = V_r \cdot m_S \cdot S_p \cdot \psi \text{ м}^3. \quad (4)$$

Количество газа в залежи после гидратообразования остается неизменным (часть газа находится в свободном, а часть – в твердом состоянии), однако объем залежи, как говорилось, при  $P_m \approx 0$  значительно уменьшается. Это уменьшение можно рассчитать, пользуясь следующим выражением:

$$\xi = \frac{V_r \cdot m}{V_0 \cdot m} = 100 \frac{(1 - S_6) \frac{P_{n\alpha} \cdot 273}{ZT} + S_6 \psi}{m_3' \frac{P_{n\alpha} \cdot 273}{ZT} + S_p \psi} \%, \quad (5)$$

где  $\xi$  – коэффициент растворимости газа в воде в пластовых условиях, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>;  $V_0$  – объем залежи до перехода ее в гидратное состояние, м<sup>3</sup>;  $S_6$  – содержание в порах связанной воды, в долях единицы объема пор.

Равнообъемные залежи с газом в свободном и гидратном состоянии при одинаковом пластовом давлении содержат различное количество газа: его больше в залежи, расположенной в зоне гидратообразования. Это превышение определяется по уравнению

$$N = \frac{Q_r}{Q_0} = 100 \frac{m_3' \frac{P_{n\alpha} \cdot 273}{ZT} + S_p \psi}{(1 - S_6) \frac{P_{n\alpha} \cdot 273}{ZT} + S_6 \psi} \% \quad (6)$$

т.е. чем выше коэффициент  $\psi$ , тем больше запасов газа в гидратной залежи по сравнению с обычной.

# НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ УСЛОВИЙ ОБРАЗОВАНИЯ И РАЗЛОЖЕНИЯ ГИДРАТОВ В ПОРИСТОЙ СРЕДЕ

С целью определения условий образования и разложения гидратов природных газов в пористой среде были проведены эксперименты в проблемной лаборатории по газу МИНХИГИЛ им. И.М. Губкина. Некоторые результаты которых даны ниже.

Для исследований был взят природный газ, состав которого показан в табл. I. В таблице приведено также первое изменение состава газа при образовании и разложении гидратов.

Изменение исходного состава газа при разложении гидратов

Природный газ	Компоненты, %					
	$N_2$	$C_4H_8N_2$	$C_2H_6$	$C_3H_8$	$i-C_4H_{10}$	$n-C_4H_{10}$
Исходный газ	1,3	93,4	5,05	1,27	0,14	0,1
Газ над гидратами	3,3	96,28	3,6	0,12	-	-
Газ при разложении гидратов	0,3	79,2	13,5	6,2	0,8	0,3

Опыты проводились в четырех термостатируемых камерах объемом от 360 до 980 см<sup>3</sup>, заполненных пористой средой — кварцевым песком под давлением до 270 ат. Гранулометрический состав песка для двух серий экспериментов показан на рис. 4.

Уплотненная пористая среда насыпалась водой, а затем часть воды вытеснилась газом. Количество связанной воды изменялось в пределах 30–75% от полной пористости. Эффективная пористость составляла от 12 до 22%.

Давление измерялось образцовыми манометрами, температура — спиртовыми термометрами и термопарами, введенными в пористую среду.

Образование и разложение гидратов в пористой среде определялось путем контроля изменения состава газа, давления и температуры в камере при известном полезном объеме порового пространства и газа, а также объемным методом. На рис. 5 приведена одна из характерных кривых изменения давления (ABD) при снижении температуры и образовании гидратов в пористой среде. На этом же рисунке дана расчетная кривая снижения давления и температуры в камере без образования гидратов (кривая ABC). Точка В на пересечении кривых ABC и ABD соответствует условиям (давление и температура) начала формирования гидратов.

Кривая EGF показывает снижение температуры, точка G — температуру начала образования гидратов при давлении, аналогичном точке В.

По результатам экспериментов построены графики (рис. 6), на которых кривая I показывает образование гидратов газа в контакте со свободной поверхностью воды, кривая 2 — в контакте с

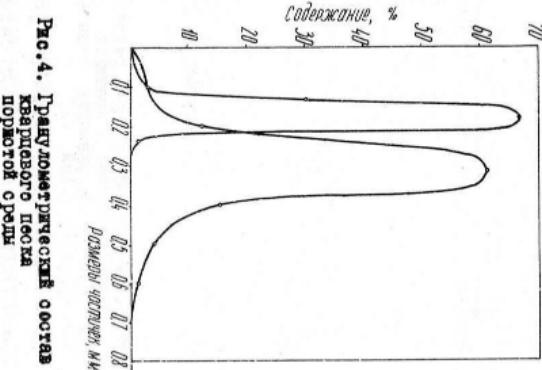


Рис. 4. Гранулометрический состав пористого песка

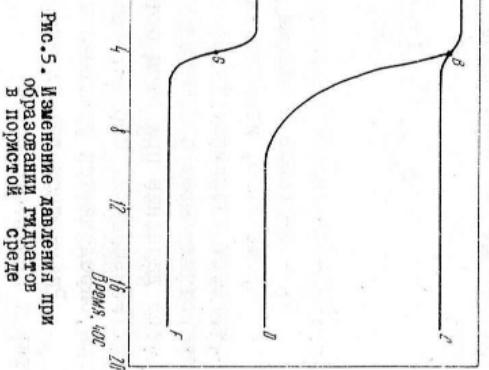


Рис. 5. Изменение давления при образовании гидратов в пористой среде

поровой водой. Образование гидратов в этих условиях протекает различно. Температура в первом случае (кривая 1) на 2-5°C ниже, а энергия - выше, чем во втором случае (кривая 2), что обусловлено силами взаимодействия поровой воды с пластом.

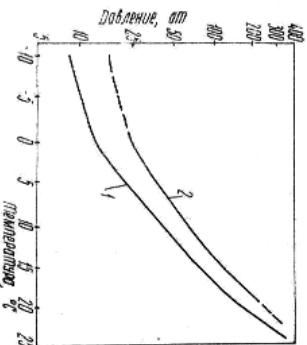


Рис.6. Условия образования гидратов

природного газа в контакте со свободной поверхностью воды (1) при постоянном начальном объеме газа в камере. Такие условия характерны для залежей природных газов с неперемещающимся газоющим контактом. Снижение давления в замкнутой залежи по отношению к начальному при образовании гидратов определяется по фор-муле

$$P_T = \frac{P_0(1-S\varphi)}{\frac{m_1}{m_2} \frac{273}{273}} \text{ ат}, \quad (7)$$

где  $P_0$  - начальное давление до образования гидратов;

$P_T$  - давление в залежи после образования гидратов.

Кроме того, исследования проводились при постоянном начальном давлении. Такие условия аналогичны для залежей природных газов с перемещающимся контактом газ-вода. Пластовое давление при этом остается постоянным, а объем залежи уменьшается. Это уменьшение по сравнению с первоначальным определяется уравнением (5).

Рассмотрим два характерных примера образования гидратов в пористой среде.

I. Образование гидратов в замкнутой камере, т.е. без

тонкого слоя воды, чем меньше радиус кривизны поверхности поровой воды, тем выше давление образования гидратов при одной и той же температуре.

По полученным данным построена кривая DFG (см. рис. 2), ограниченная зоной возможного формирования гидратов в условиях, близких к исследуемым.

Эксперименты выполнялись в камере (2) при постоянном начальном объеме газа в камере. Такие условия характерны для залежей природных газов с неперемещающимся газоющим контактом. Снижение давления в замкнутой залежи по отношению к начальному при образовании гидратов определяется по фор-

муле дополнительной пачки газа, при этом давление снижается до величины равновесного давления, соответствующего температуре в камере.

Например, при начальном давлении 70 ат при температуре 14°C. Образование же гидратов происходит при температуре 14°C. При начальном давлении 70 ат формирование гидратов начинается при температуре 11°C (кривая 2, рис.6) и при снижении температуры до 0°C давление в камере уменьшается до 25 ат.

На рис.7 показана зависимость уменьшения давления в камере ( $\Delta P$ ) как функция снижения температуры гидратообразования ( $\Delta t$ ).

Чем выше температура начального гидратообразования, тем большее депрессия давления при понижении температуры на один градус, т.е. с понижением температуры и давления интенсивность гидратообразования уменьшается.

На рис.8 графически изображено изменение давления при отборе газа из камеры, где часть газа - в виде гидратов.

Если в камере с пористой средой, насыщенной водой в свободном объеме пор, равном 0,1 л, при  $P=100$  ат и  $t=20^\circ\text{C}$  находится около 12,3 л газа, то при образовании гидратов ( $t=+5^\circ\text{C}$ )

такое количество газа сокращается в камере при давлении 37 ат (точка А, рис.8). Иными словами, при данном давлении объем газа в камере с гидратами примерно в три раза больше, чем в камере без гидратов.

Точка Д на графике рис.8 соответствует начальному давлению в камере, содержащей те же 12,3 л газа, но в безгидратном свободном состоянии.

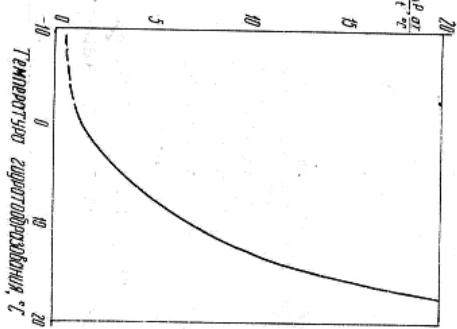


Рис.7. Кривая зависимости  $\Delta P$  от температуры гидратообразования

При отборе газа из камеры без гидратов давление снижается по кривой АВС (рис.8), а из камеры, содержащей гидраты при температуре 5°C, изменение давления происходит по кривой АВС'. Как видно из рис.8, при наличии гидратов в камере в начальный период отбора газа производится при постоянном давлении (AB), равном давлению разложения гидратов. После полного разложения гидратов (точка В) дальнейший отбор газа сопровождается снижением давления (BC).

2. Если поддерживается постоянное давление, то при образовании гидратов идет накопление газа в камере. Объем накапливающегося газа может в несколько раз превышать объем газа, соответствующий давлению и температуре в камере, где гидрат отсутствует. При этом количество газа в камере (пластовом газе) определяется уравнением (1). Например, при поддержании постоянными  $P=5$  ат и  $t=0^{\circ}\text{C}$  в камере происходит формирование гидратов газа. При этом часть его находится в свободном состоянии и часть — в виде гидратов.

На рис.9 показана зависимость давления от различных условий отбора газа из камеры.

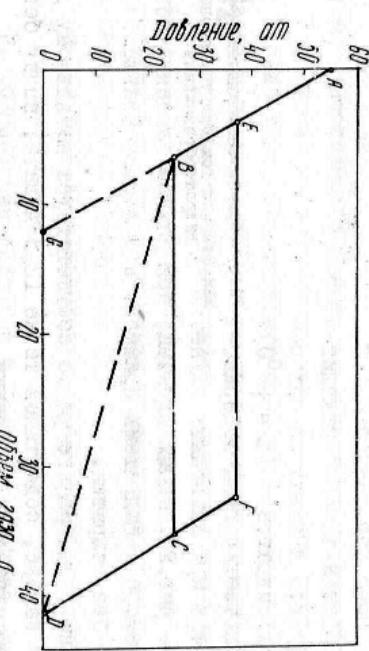


Рис.8. Изменение давления при отборе газа из камеры, содержащей гидраты.

(1). Например, при поддержании постоянными  $P=5$  ат и  $t=0^{\circ}\text{C}$  в камере происходит формирование гидратов газа. При этом часть его находится в свободном состоянии и часть — в виде гидратов. На рис.9 показана зависимость давления от различных условий отбора газа из камеры.

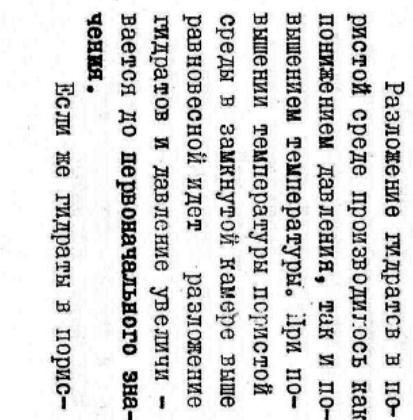


Рис.9. Изменение давления в камере в процессе образования гидратов при постоянном начальном давлении.

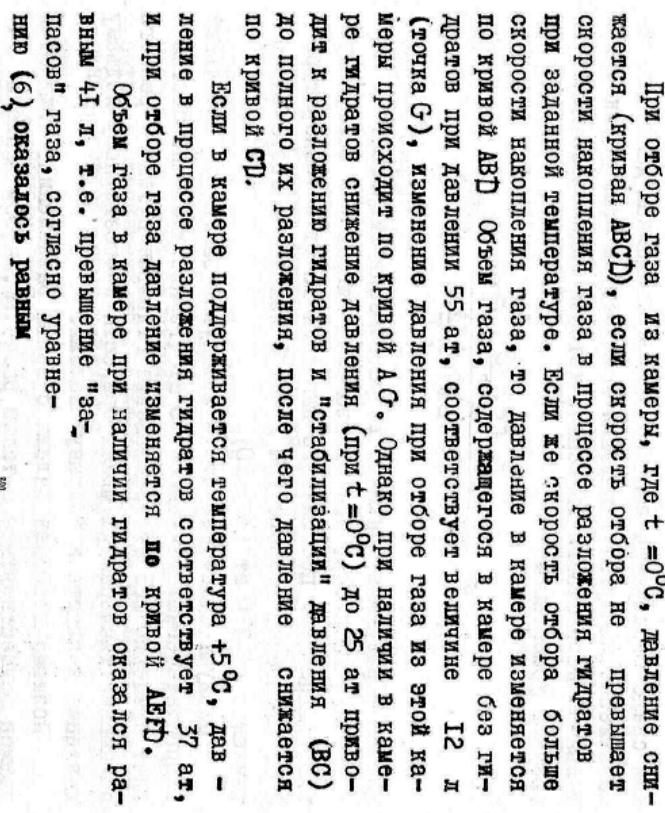


Рис.10. Изменение давления в процессе разложения гидратов в пористой среде.

той среде образуются при постоянном начальном давлении, то разложение их путем повышения температуры приводит к значительному возрастанию давления, которое можно рассчитать, пользуясь уравнением:

$$P_r = \frac{\frac{P_r 273}{\frac{2}{273}} + 56\psi}{(1 - 56) \frac{273}{273}} dT, \quad (8)$$

где  $P_r$  — давление в камере до разложения гидратов.

Так, например, при образовании гидратов в камере при  $20^\circ\text{C}$ , повышение температуры до  $24^\circ\text{C}$  привело к возрастанию давления до 270 ат (рис.10).

Следует отметить, что в замкнутой залежи с начальным гидростатическим давлением 50 ат (горное давление составляют примерно 125 ат) разложение гидратов путем резкого повышения температуры может привести к чрезмерному повышению давления в пласте и "зарыву" залежи.

Поэтому подогрев залежи с целью разложения гидратов должен осуществляться с таким расчетом, чтобы давление газа при этом не превышало горного давления.

Наряду с подогревом и снижением давления для отбора газа из гидратной залежи можно применять инъекцию в пласт ингибиторов (спирты, гликоли, электролиты и т.д.), разлагают гидраты.

## ВЫВОДЫ

1. В зоне распространения зечной мерзлоты природный газ в пластовых условиях может находиться частично или полностью в гидратном состоянии.

2. Глубина залегания месторождения газа в состояния гидратов зависит от глубины распространения зечной мерзлоты, геотермического градиента под зечной мерзлотой, давления, состава газа и воды, а также от качества пористой среды.

3. Запасы газа в гидратных залежах значительно превышают запасы в безгидратных. Рекомендована методика определения запасов природного газа в залежах, содержащих его частично или полностью в состоянии гидратов.

4. При вскрытии "закупоренных" гидратных залежей может иметь место аномально низкое пластовое давление, в несколько раз ниже первоначального гидростатического.

5. Разработку залежей, содержащих газ частично в виде гидратов, можно производить путем уменьшения давления, соответствующего условиям разложения гидратов, подогрева залежи выше температуры разложения гидратов и инъекций в пласт ингибиторов.

6. При яром водонапорном режиме необходимо применять метод подогрева, так как снижение давления в пласте приведет к поступлению воды в пласт и потреблению гидратного газа.

7) При переходе залежи в гидратное состояние контакт газа остается неизменным.

7. При разработке гидратных залежей имеет место период постоянного пластового давления, когда с отбором газа при разносном давлении идет разложение гидратов. Площадка постоянного давления тем выше, чем больше температура залежи.

8. При образовании гидратов с поддержанием постоянного давления идет значительное накопление газа, который при разложении гидратов в замкнутом объеме может создать давление, во много раз превышающее начальное.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Основы геокриологии (мерзлотоведения), часть I, изд. АН СССР, 1959.
2. Макогон Ю.Ф. Образование гидратов в газоносном пласте в условиях многолетней мерзлоты. "Газовая промышленность", 1965, № 5.

## СОДЕРЖАНИЕ

### ГАЗОВАЯ ПРОМЫШЛЕННОСТЬ № 8

Размещение залежей, содержащих природный газ в пласте в виде гидратов .....	3
Определение запасов газа в залежах, покуроченных к зонам вечной мерзлоты .....	5
Некоторые результаты исследования условий образования и разложения гидратов в пористой среде .....	8
Выводы .....	15
Литература .....	17

Юрий Федорович Макогон

ОСОБЕННОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПРИРОДНЫХ ГАЗОВ В ЗОНЕ ВЕЧНОЙ МЕРЗЛОТЫ

Научный редактор К.С. Басинев

Редактор Э.Н. Исламов

Технический редактор В.А. Еланкур

Корректор А.А. Хорошев

Л-28775  
Подписано в печать 11.7.1988 г.

Формат 84х108/32

Угл.-изд.л. 0,8

Печ.л. 0,8

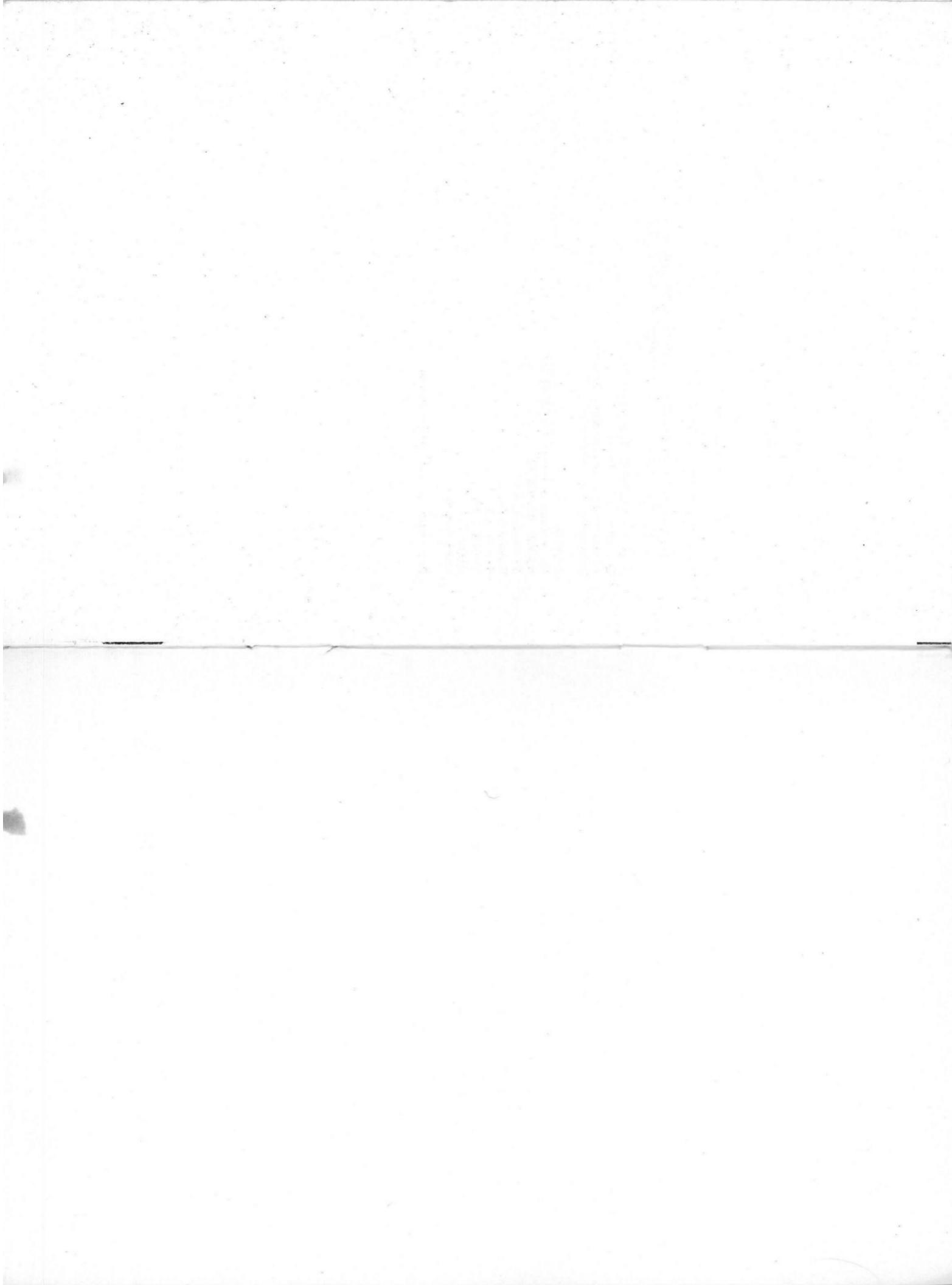
Бум.л. 0,3

Тираж 1000

Заказ 258

Цена 4 коп.

Ротапринт ЦНТИ Минтранспрома



---

ЦЕНТР НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ  
МИНИСТЕРСТВА ГАЗОВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ  
МОСКВА 1966