

МОДЕЛЬ ОПТИМАЛЬНОГО РАЗМЕЩЕНИЯ СКВАЖИН НА ПОДЗЕМНЫХ ХРАНИЛИЩАХ ГАЗА¹

Ермолаев А.И.

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет)

имени И.М. Губкина»,

Россия, г. Москва, Ленинский проспект, д.65

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН,

Россия, г. Москва ул. Профсоюзная д.65

ermolaev.a@gubkin.ru

Латипов А.Р.

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН,

Россия, г. Москва ул. Профсоюзная д.65

latipov257@gmail.com

Аннотация: В статье предложена модель оптимизации размещения эксплуатационных скважин на подземном хранилище газа (ПХГ), основанная на критериях эффективности, учитывающих геологическое строение газохранилища и особенности процессов его эксплуатации. Приведены тестовые примеры решения задачи для упрощенной модели ПХГ.

Ключевые слова: ПХГ, модель, скважина, расстановка, оптимизация, задача.

Введение

Подземные хранилища газа (ПХГ) представляют собой природную или искусственную емкость, предназначенную для резервирования больших объемов газа и подачи его в магистральные газопроводы.

В отличие от процесса разработки газовых месторождений, эксплуатация подземных хранилищ предполагает не только отбор газа из залежи, но и обратную закачку, причем и отбор, и закачка проводятся за 90-180 суток. Это возможно благодаря более плотной сетки эксплуатационных скважин на ПХГ по сравнению с применяемыми при разработке газовых месторождений [1, 2].

Рациональное размещение эксплуатационных скважин на газохранилищах является первоочередной задачей, решаемой на стадии проектирования ПХГ, так как от выбранной схемы их расстановки зависят все технико-экономические показатели эффективности процессов создания и циклической эксплуатации ПХГ. В свою очередь, на расстановку скважин влияют геолого-гидродинамические характеристики пласта-коллектора (подземной части газохранилища), рассчитанная и принятая система заполнения хранилища газом, проектные объемы закачиваемого и отбираемого газа, особенности местности и варианты использования скважин (только для нагнетания, только для отбора, для нагнетания и отбора) [3]. Нахождение оптимального решения усложняется тем, что некоторые из критериев оптимальной расстановки не могут быть полностью формализованы без привлечения экспертной информации.

Существующие подходы к решению поставленной задачи требуют формирования предварительного перечня возможных вариантов расстановки скважин. Остается открытым вопрос о количестве и качестве таких вариантов. Недостаточное число предварительных вариантов может привести к выбору «лучшего варианта из худших». Избыточное количество вариантов приводит к неоправданным временным затратам. В отличие от этого, предлагаемая в данной работе модель не требует заранее заданных вариантов размещения скважин и в автоматизированном режиме формирует схемы расстановки скважин, ориентированные на выполнение технологических критериев оптимальности, учитывающие особенности процессов эксплуатации ПХГ.

1 Постановка задачи

Предлагаемый подход к решению проблемы рационального размещения числа скважин на ПХГ

¹ Работа выполнена при частичной поддержке Российского научного фонда (проект 21-71-20034).

основан на её формализации в виде многокритериальной модели нелинейного дискретного программирования. Под оптимальной расстановкой скважин понимается такое их размещение, которое обеспечивает:

- 1) максимально возможное удаление от границ газонасыщенной зоны ПХГ;
- 2) максимально возможные расстояния между скважинами;
- 3) размещение в зонах с наибольшей газонасыщенной толщиной.

Искомые переменные задачи представляют собой булевы переменные, а в комплекс исходных данных включаются геометрические характеристики газонасыщенной части ПХГ. Размещению подлежит заданное число скважин, которое определяется, исходя из ограничения на величину допустимого давления нагнетания газа и закачки требуемого объема газа (объема буферного газа и объема активного газа).

Под газонасыщенной толщиной – h понимается расстояние от кровли залежи, где создается ПХГ, до замыкающей изогипсы (рис. 1).

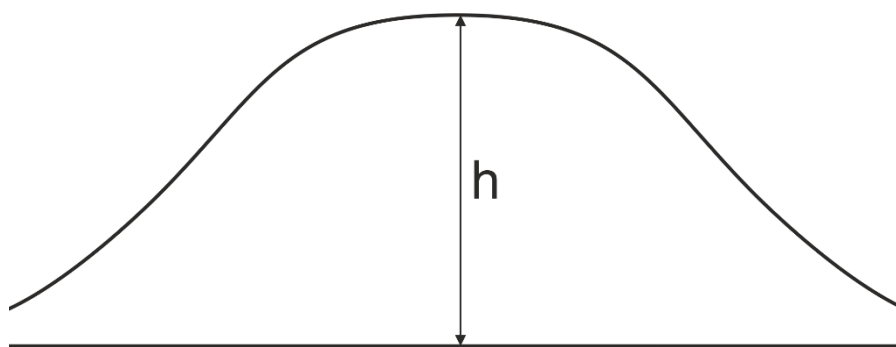


Рис. 1. Качественная схема газонасыщенной зоны ПХГ

Максимизация расстояния от скважин до границ пласта-коллектора направлена на снижение риска ухода газа за замыкающую изогипсу, т.е. на минимизацию потерь газа. Максимизация расстояний между скважинами направлена на равномерное дренирование скважинами газонасыщенного объема. Расположение скважин в зонах с наибольшей газонасыщенностью направлено на создание компактной газонасыщенной зоны ПХГ, что, в том числе, способствует снижению капитальных затрат на создание ПХГ.

Для пояснения постановки задачи заменим залежь двумерной областью, состоящей из одинаковых блоков, каждый из которых имеет форму квадрата (рис. 2). Если эксплуатация ПХГ будет осуществляться вертикальными скважинами, то количество блоков будет определяться минимально допустимым расстоянием между забоями скважин. Если же предполагается применение горизонтальных скважин, то блок должен иметь размеры, позволяющие разместить в нем горизонтальный ствол [4, 5]. Зная размеры одного блока и площадь участка по латерали, можно определить число блоков. При этом линия, обозначающая границу участка, заменяется «поясом», состоящим из блоков, выделенных желтым цветом (рис. 2).

В центр каждого из остальных блоков можно разместить скважину. Задача состоит в определении блоков, выделенных белым цветом, в центре каждого из которых можно разместить скважину.

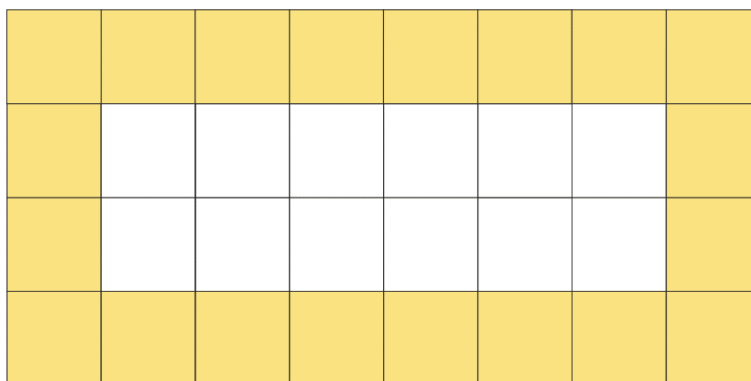


Рис. 2. Аппроксимация залежи двумерной областью

2 Математическая формулировка задачи

Перейдем к математической формулировке задачи. Пусть количество желтых блоков равняется m , число белых – n . Пусть R_{ij} – расстояние между центрами любой пары блоков, причем $R_{ij}=R_{ji}$, $R_{ii}=0$ для $i=1, \dots, (n+m)$ и $R_{ij}=0$ для $i, j= n+1, n+2, \dots, n+m$ (расстояния между центрами желтых блоков принимаются равными нулю). Пусть h_i – средняя газонасыщенная толщина i -го блока, где $i=1, \dots, n$. Вводится искомая переменная x_i : $x_i=0$, если в i -м блоке скважины нет, и $x_i=1$, если в i -м блоке размещается скважина.

Вводится условие: $x_i=1$ для всех $i=n+1, n+2, \dots, n+m$, т.е. заранее в центр каждого желтого блока ставится «фиктивная» скважина. Суммарное число скважин (проектируемых и «фиктивных») равняется $s+m$.

Пусть

$$r_{ij} = \frac{R_{ij}}{R}, R = \max_{i,j} \{R_{ij}\}, i, j = \overline{1, (n+m)}; \quad (1)$$

$$a_i = \frac{h_i}{h}, i = \overline{1, n}; \quad h = \max_{1 \leq i \leq n} \{h_i\}. \quad (2)$$

Теперь задача сводится к многокритериальной модели нелинейной дискретной оптимизации:

$$F_1(X) \equiv \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n r_{ij} x_i x_j \rightarrow \max_x \quad (3)$$

$$F_2(X) \equiv \sum_{i=1}^n (\sum_{j=n+1}^{n+m} r_{ij}) x_i \rightarrow \min_x \quad (4)$$

$$F_3(X) \equiv \sum_{i=1}^n a_i x_i \rightarrow \max_x \quad (5)$$

$$\sum_{i=1}^n x_i = s \quad (6)$$

$$x_i \in \{0, 1\}, \quad i = \overline{1, n} \quad (7)$$

$$x_i = 1, \quad i = \overline{(n+1), (n+m)}. \quad (8)$$

Функция цели $F_1(X)$ в критерии оптимальности (3) определяет расстояния между «настоящими» скважинами, $F_2(X)$ в критерии (4) определяет расстояние между границами и скважинами, т.е. между «фиктивными» и «настоящими» скважинами, критерий (5), включающий функцию цели $F_3(X)$, направлен на выбор размещения скважин в зонах с наибольшей газонасыщенностью.

Для решения задачи (3)-(8), прежде всего, необходимо ввести один обобщенный (интегральный) критерий оптимальности, составляющими которого являются 3 исходных критерия, т.е. выполнить свертку критериев. С этой целью введем оценки важности (веса) критериев: $\alpha, \beta: 0 \leq \alpha \leq 1, 0 \leq \beta \leq 1$.

Оценки важности могут быть определены с помощью экспертов. При известных оценках важности критериев (3)-(8) многокритериальная задача заменяется задачей с одним критерием:

$$\alpha \cdot [\beta F_1(X) - (1 - \beta) F_2(X)] + (1 - \alpha) \cdot F_3(X) \rightarrow \max_x \quad (9)$$

и ограничениями (6)-(7).

Оценка важности – α позволяет регулировать влияние показателей «расстояние» и «газонасыщенная толщина» (увеличение α ведет к большему влиянию критериев (3) и (4) по отношению к критерию (5)). Оценка важности β позволяет регулировать влияние показателей «расстояние между скважинами» и «расстояние между скважинами и границами» (увеличение β ведет к большему влиянию критерия (3) по отношению к критерию (4)).

Теперь решается однокритериальная задача (9), (6)-(8). Меняя значение α и β , можно усиливать или ослаблять влияние того или иного критерия и, соответственно, получать различные варианты размещения для фиксированного числа скважин.

Использование экспертного опроса для определения оценок важности позволяет не только учесть опыт специалистов по проектированию ПХГ, но и найти разумный компромисс между полностью формализованным и полностью «ручным» подходами к проектированию процессов создания и эксплуатации ПХГ.

3 Примеры формирования схем размещения скважин

Рассмотрим примеры применения предлагаемой модели оптимальной расстановки эксплуатационных скважин для упрощенной модели газохранилища, имеющую однородную почти симметричную форму (рис. 3).

Между центрами блоков расстояние составляет 200 м (длина стороны квадрата). Число всех блоков (желтых и серых) равняется 125, число желтых – $m=32$ (соответственно, число «фиктивных» скважин). Число серых блоков, в которых можно расставить проектируемые скважины равняется 93

($n=93$). Число проектируемых скважин равняется 5 ($s=5$). Центральный блок имеет толщину 25 м. Соседние к нему блоки имеют толщину – 20 м, соответственно, соседние к предыдущим – 15 м и т.д. Толщина всех желтых блоков, т.е. блоков, содержащих фиктивные скважины, принята равной нулю.

| | | | | | | | | | | | | |
|--|---|---|----|----|----|----|----|----|----|---|---|--|
| | | | | | | | | | | | | |
| | | | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | | | |
| | | | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | | | |
| | | 5 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 5 | | |
| | | 5 | 10 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 10 | 5 | | |
| | 0 | 5 | 10 | 15 | 20 | 20 | 20 | 15 | 10 | 5 | 0 | |
| | 0 | 5 | 10 | 15 | 20 | 25 | 20 | 15 | 10 | 5 | 0 | |
| | 0 | 5 | 10 | 15 | 20 | 20 | 20 | 15 | 10 | 5 | 0 | |
| | | 5 | 10 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 10 | 5 | | |
| | | 5 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 5 | | |
| | | | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | | | |
| | | | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | | | |
| | | | | | | | | | | | | |

Рис. 3. Распределение газонасыщенной толщины в зоне размещения скважин

Ниже (рис. 4-7) приведены результаты решения задачи при различных значениях оценок важности α , β с помощью программного комплекса по оптимизации Gurobi Optimizer [6]. Расположение скважин отмечено знаком «*», причем блоки, выделенные серым цветом, содержат проектируемые скважины.

| | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | * | * | * | * | * | | | | |
| | | | * | | | | | | * | | | |
| | | * | | | | | | | | * | | |
| | * | | | | | | | | | | * | |
| | * | | | | | | | | | | * | |
| * | | | | | * | | * | | | | | * |
| * | | | | | | * | | | | | | * |
| * | | | | | * | | * | | | | | * |
| | * | | | | | | | | | | * | |
| | * | | | | | | | | | | * | |
| | | * | | | | | | | | * | | |
| | | | * | | | | | | * | | | |
| | | | | * | * | * | * | * | | | | |

Рис. 4. Размещение скважин при $\alpha=0,2$ и $\beta=0,35$ (вариант 1)

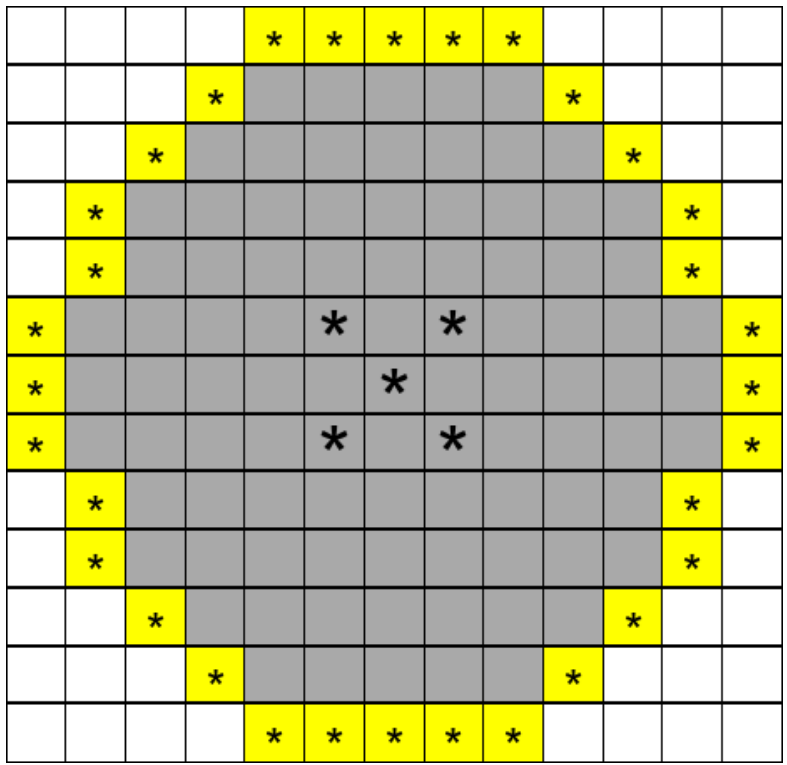


Рис. 5. Размещение скважин при $\alpha=0,5$ и $\beta=0,5$ (вариант 2)

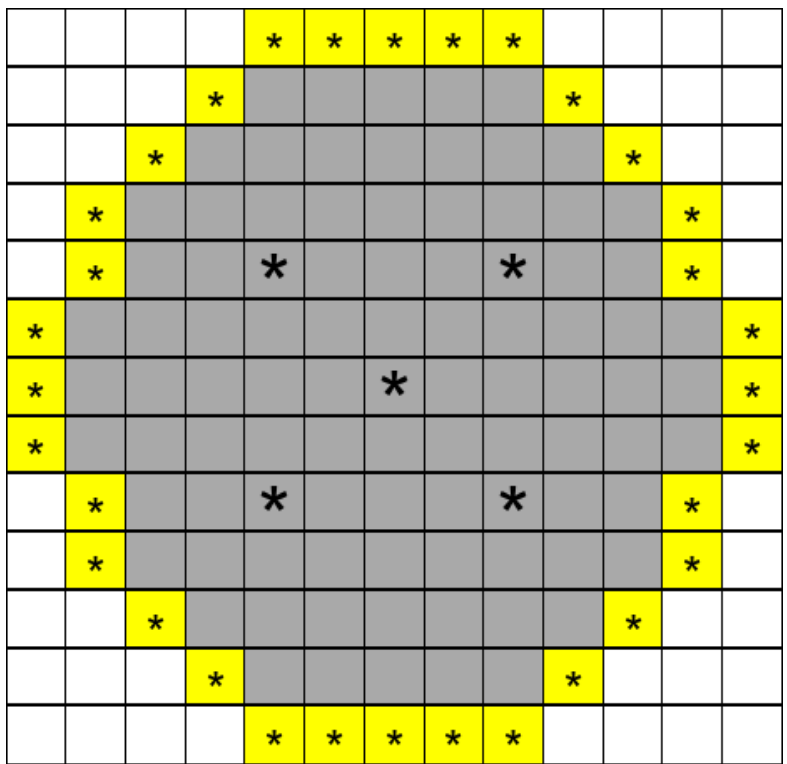


Рис. 6. Размещение скважин при $\alpha=0,5$ и $\beta=0,65$ (вариант 3)

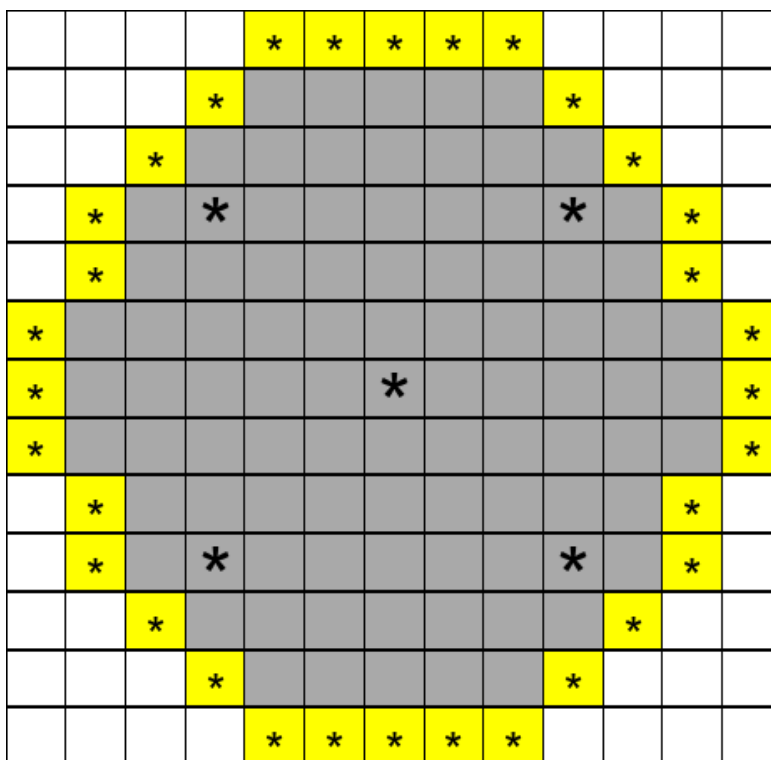


Рис. 7. Размещение скважин при $\alpha=0,8$ и $\beta=0,65$ (вариант 4)

Выполним анализ сформированных вариантов расстановки скважин. В варианте 1 (рис. 4, $\alpha=0,2$ и $\beta=0,35$) скважины группируются в центральной зоне из-за «сильного» влияния показателя «газонасыщенная толщина». Оценка важности этого критерия в варианте 1 равняется $(1-\alpha)=0,8$. В варианте 2 (рис. 5, $\alpha=0,5$ и $\beta=0,5$) размещение скважин осталось без изменения в сравнении с вариантом 1. Ослабление показателя «газонасыщенная толщина» оказалось не достаточным, чтобы показатели «расстояние между скважинами» и «расстояние между скважинами и границами» изменили расстановку скважин. Однако уже в варианте 3 (рис. 6, $\alpha=0,5$ и $\beta=0,65$) усиление показателя «расстояние между скважинами» с $\beta=0,5$ до $\beta=0,65$ привело к увеличению расстояния между скважинами (забоями скважин). В варианте 4 (рис. 7, $\alpha=0,8$ и $\beta=0,65$) соответствует доминированию показателя «расстояние между скважинами» над показателями «газонасыщенная толщина» и «расстояние между скважинами и границами», что приводит к оттеснению скважин в периферийные зоны (к границам газонасыщенной зоны). В приведенных примерах наиболее «уравновешенным» вариантом является вариант 3.

Итак, в предлагаемой процедуре вместо формирования с помощью экспертов (проектировщиков) первоначального множества вариантов расстановки скважин, осуществляется перебор возможных на взгляд экспертов значений оценок важности (весов) критериев оптимальности. Это, во-первых, может оказаться более простой задачей для экспертов и, во-вторых, процедура позволяет создать предварительное множество вариантов расстановки скважин, каждый уже является оптимальным для определенного набора оценок важности критериев.

Заключение

К основным результатам и выводам данной работы можно отнести:

- предложены критерии оптимальности, ориентированные на создание компактной газонасыщенной зоны ПХГ, что направлено на снижение потерь газа при его нагнетании в ПХГ, увеличение охвата пластовой части ПХГ и равномерного отбора газа из газонасыщенной зоны, снижение риска обводнения скважин на стадии отбора газа из ПХГ;
- предложено преобразование исходной задачи, позволяющее её заменить однокритериальной задачей (за счет свёртки критериев), для решения которой можно применить стандартные методы дискретной оптимизации, реализованные в существующих программных комплексах по оптимизации;
- приведены результаты расчетов, позволяющие оценить работоспособность предлагаемого подхода к формированию схем размещения скважин на ПХГ.

Литература

1. *Самуйлова Л. В.* Подземное хранение газа и жидкости / Л. В. Самуйлова. — Текст: электронный // Studylib: [сайт]. — URL: <https://studylib.ru/doc/6246250/prezentaciya-phg-> (дата обращения: 29.05.2022).
2. *Ермилов О.М., Ремизов В.В., Ширковский А.И., Чугунов Л.С.* Физика пласта, добыча и подземное хранение газа. - М.: Наука, 1996. - 541 с.
3. *Левыкин Е. В.* Технологическое проектирование хранения газа в водоносных пластах. М., «Недра», 1973, 208 с.
4. *Ермолаев А.И., Кувичко А.М., Латипов А.Р., Пучковский С.А.* Формирование рациональных схем размещения добывающих скважин на газовой залежи // Труды Российского государственного университета нефти и газа имени И.М. Губкина. 2021. № 3 (304). С. 34-44.
5. *Ермолаев А.И., Кувичко А.М., Латипов А.Р.* Проектирование оптимальных схем размещения скважин на газовых залежах / Управление развитием крупномасштабных систем (MLSD'2021) : Труды Четырнадцатой международной конференции, Москва, 27–29 сентября 2021 года / Под общей редакцией С.Н. Васильева, А.Д. Цвиркуна. – Москва: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2021. – С. 622-627. – DOI 10.25728/1000.2021.38.22.001. – EDN SQRHMB.
6. *Gurobi Optimization, LLC.* Gurobi Optimizer Reference Manual. <http://www.gurobi.com>, 2022.