

Е.Д. Кулаков, А.С. Михалев, А.В. Саренков, А.Д. Шуталев,
А.Е. ФЕДОРЕВ

АЛГОРИТМ КОРРЕКТИРОВКИ ПОЛОЖЕНИЯ КУСТОВЫХ ПЛОЩАДОК ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧИ РАЗРАБОТКИ НЕФТЯНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Кулаков Е.Д., Михалев А.С., Саренков А.В., Шуталев А.Д., Федорев А.Е. Алгоритм корректировки положения кустовых площадок при решении задачи разработки нефтяных месторождений.

Аннотация. Данная статья посвящена проблеме автоматизации этапа объединения скважин в кусты, рассматриваемого в рамках процесса проектирования разработки нефтяных месторождений. Решение задачи объединения скважин в кусты заключается в определении наилучшего расположения кустовых площадок и распределения скважин по кустам, при которых будут минимизированы затраты на разработку и обслуживание нефтяного месторождения, а ожидаемый дебит максимизирован. Одним из используемых на сегодняшний день подходов является применение оптимизационных алгоритмов. При этом данная задача влечет за собой учет технологических ограничений при поиске оптимального варианта разработки нефтяного месторождения, обоснованным в том числе действующими в отрасли регламентами, а именно минимальное и максимальное допустимое количество скважин в кусте, а также минимально допустимое расстояние между двумя кустовыми площадками. Использование алгоритмов оптимизации не всегда гарантирует оптимальный результат, при котором соблюдаются все заданные ограничения. В рамках данного исследования предложен алгоритм, который позволяет обрабатывать получаемые проектные решения с целью устранения нарушенных ограничений на этапе оптимизации. Алгоритм последовательно решает следующие проблемы: нарушение ограничений на сверхмалое и сверхбольшое количество скважин в кусте; несоответствие числа кустов с заданным; нарушение ограничения на сверхблизкое расположение кустов. Для исследования эффективности разработанного подхода был проведен вычислительный эксперимент на трех сгенерированных синтетических месторождениях с разной геометрией. В рамках эксперимента сравнивалось качество работы оптимизационного метода и предложенного алгоритма, который является надстройкой к оптимизационному. Сравнение проводилось на различных значениях мощности оптимизации, которое обозначает максимальное количество запусков целевой функции. Оценка качества работы сравниваемых подходов определяется величиной штрафа, которая обозначает степень нарушения значений основных ограничений. Критериями эффективности в данной работе являются: среднее значение, среднеквадратичное отклонение, медиана, минимальное и максимальное значения величины штрафа. За счет использования данного алгоритма величина штрафа для первого и третьего месторождений в среднем уменьшается соответственно до 0.04 и 0.03, а для второго месторождения алгоритм позволил получить проектные решения без нарушения ограничений. По результатам проведенного исследования сделано заключение относительно эффективности применения разработанного подхода при решении задачи разработки нефтяных месторождений.

Ключевые слова: нефтяное месторождение, разработка нефтяных месторождений, нефтяная скважина, кустовое бурение, нарушение проектных ограничений, корректировка положения кустовых площадок.

1. Введение. Согласно прогнозам, на ближайшие 20–30 лет производство нефти в России практически обеспечено уже разведанными запасами [1]. Однако по оценкам экспертов основная часть прироста нефтяных запасов приходится на ресурсы, неэффективные для разработки [2–5]. Поэтому в среднесрочном периоде Россия может столкнуться с проблемой поддержания достигнутых объемов добычи. Для разработки новых участков потребуется осваивать экстремальные климатические зоны, шельф и другие участки, удаленные от существующих объектов инфраструктуры, что повышает стоимость их вовлечения в разработку.

Современный энергетический рынок отличается нестабильностью и колебанием цен, связанных в первую очередь с геополитической борьбой лидирующих держав планеты [6–8] и неблагоприятной эпидемиологической обстановкой в мире [9]. При этом полноценной альтернативы нефти нет, и она еще долго будет одним из важнейших ресурсов для функционирования и развития человечества.

По запасам нефти и газа Россия опережает другие страны, однако отстает по объему геологоразведочных работ и техническому оснащению. С учётом меняющейся структуры запасов для сохранения рентабельности нефтедобывающие компании должны изыскивать возможности сокращения издержек и повышения своей эффективности. Ускорить процесс добычи нефти поможет только инвестирование средств в масштабную геологоразведку и полная цифровизация нефтедобывающей отрасли [10–14].

Под процессом цифровизации в данном случае имеется в виду автоматизация всех составляющих этапов разработки и освоения нефтяных месторождений. Внедрение цифровых решений в нефтедобывающую отрасль позволит значительно повысить эффективность производственных процессов в компании за счет оптимизации и анализа данных, а также сократить влияние человеческого фактора на принимаемые проектные решения.

Потенциальный прирост извлекаемых запасов нефти на территории России может составить 6,8 миллиардов тонн за счет технологического развития отрасли [15]. Цифровизация нефтедобывающей отрасли может позволить нарастить добычу к 2035 году до 607 миллионов тонн с учетом экономических и инфраструктурных ограничений [16].

На реализацию проектных решений по обустройству нефтяных месторождений может приходиться до 80% и более общего объема капитальных вложений. Очевидно, что в таком случае

при проектировании требуется уделять внимание поиску оптимальной схемы разбуривания месторождения.

В связи с этим на этапе цифровизации нефтяной отрасли первоочередной становится задача автоматизации этапа планирования нефтяных месторождений за счет внедрения технологий интеллектуального анализа данных, машинного обучения и методов оптимизации [17 – 19].

В рамках данной научной работы рассматривается наиболее распространённый сценарий разработки месторождения УВС – с использованием кустового бурения. Далее будет представлено описание кустового бурения.

2. Описание кустового бурения. Решение задачи разработки нефтяных месторождений заключается в том числе в выборе наиболее эффективного метода разбуривания. Среди существующих методов наиболее эффективным на сегодняшний день является кустовое бурение [20 – 24].

Кустовое бурение представляет собой сооружение скважин (в основном наклонно-направленных), устья которых группируются на близком расстоянии друг от друга на общей ограниченной площадке (основании).

Применение метода кустового бурения имеет следующие преимущества [25 – 27]:

- сокращение материальных и трудовых затрат на инженерное обустройство площадок под скважины;
- уменьшение объемов перевозок;
- повышение рентабельности разработки;
- упрощение процессов добычи и ее автоматизации;
- уменьшение техногенного воздействия на окружающую природную среду.

Используют метод кустового бурения в таких природно-климатических условиях, при которых строительство и обслуживание на значительном удалении друг от друга нефтяных сооружений, коммуникаций и дорог будет стоить сверхбольших капиталовложений [28]. Так, например, кустовое бурение используется в условиях моря на территории шельфовых месторождений. Также указанный выше метод используют в горной, лесной и болотистой местностях.

Обычно при применении метода кустового бурения сталкиваются со следующими основными проблемами:

- определение количества кустовых площадок;
- определение расположения кустовых площадок и распределения скважин между ними.

Число скважин в кусте может достигать 24 штук. Исходя из минимального и максимального количества скважин в кусте и общего количества скважин на территории месторождения, эксперт определяет допустимый диапазон количества кустовых площадок. Но зачастую при решении задачи расположения кустовых площадок и распределения скважин между ними приходится сталкиваться с такими схемами разработки месторождения, при которых их реализация либо будет стоить в разы больше капиталовложений, либо будет вообще невозможна. В связи с этим появляется необходимость определения оптимального диапазона количества кустовых площадок для различных схем разработки месторождений.

При проектировании нефтяных месторождений приходится формировать значительное число исходных проектных вариантов, из которых впоследствии выбирается оптимальный. Поэтому в таких случаях требуется дополнять знания, опыт и интуицию проектировщиков большим объемом геолого-промысловой информации и значительным объемом расчетных данных, что приводит к необходимости применения средств автоматизированного проектирования.

В следующем разделе будет приведен литературный обзор существующих решений задачи кустования скважин.

3. Литературный обзор. На сегодняшний день задаче автоматизации размещения кустовых площадок и распределения скважин между ними посвящено мало работ.

В статье [29] предложены две модели для решения поставленной задачи, которые отличаются наборами исходных данных. В первой модели задача размещения кустовых площадок сводится к задаче целочисленной оптимизации. Во второй модели алгоритм поиска наилучшего расположения кустовых площадок представляет собой итерационную процедуру. При этом для решения задачи предлагается использовать метод, основанный на «лангранжевой релаксации» [30*]. В основе обеих моделей заложена идея минимизации суммарного квадратичного отклонения скважин от кустовых площадок, представленная в дискретном виде.

В работе [30] предлагается методика кустования скважин для различных вариантов систем разработки. Задачу определения положения кустовых площадок предлагается решать, как задачу глобальной оптимизации. В качестве критериев оптимальности авторы статьи используют минимизацию суммарной проходки при бурении и технико-экономический показатель, который учитывает потенциал добывающих скважин и стоимостные характеристики объектов.

Авторы работы [31] предлагают для решения поставленной задачи метод оптимизации на основе интеллектуальной последовательной выборки, согласно которой отбор элементов генеральной совокупности проводится последовательно, на каждом этапе собирается и анализируется информация и принимается решение о дополнительном отборе элементов генеральной совокупности. Предыдущие вычисления алгоритма учитываются при выборе следующей выборки, что в свою очередь позволяет обеспечить более высокую сходимость по сравнению с аналогами. В качестве целевой функции использовался чистый дисконтированный доход за 5 лет.

Авторы статьи [24] предлагают подход определения оптимального распределения скважин между кустами на основе перебора группировок всех скважин. При отборе наилучшего варианта кустования скважин ключевыми показателями являются:

- объем добычи нефти;
- накопленный объем добычи нефти;
- чистый дисконтированный доход.

В статье [32] задача кустования скважин сводится к задаче кластеризации. Предложенный подход представляет собой сочетание классического алгоритма кластеризации и метода оптимизации. В экспериментах в качестве метода оптимизации использовались генетический алгоритм и метод роя частиц. В данном подходе также применяется метод поиска ассоциативных правил для выявления закономерностей между скважинами для выявления наиболее сильных кустов.

Авторы статьи [33] используют модифицированный алгоритм кластеризации k -средних для нахождения оптимальной схемы кустования скважин. В качестве основного критерия оптимальности для алгоритма кластеризации выступает минимизация суммарной проходки наклонных и горизонтальных скважин с учетом сложности их траекторий.

Рассмотренные подходы для решения поставленной задачи обычно заключаются в сведении её к оптимизационному виду. При выборе оптимального размещения кустовых площадок учитываются следующие возможные показатели:

- суммарное квадратичное отклонение скважин от кустовых площадок;
- суммарная проходка при бурении;
- чистый дисконтированный доход;
- объем добычи нефти.

Рассмотренные показатели являются только технико-экономическими, при этом решение данного класса задач требует необходимости учитывать конструкционные особенности. В рассматриваемой статье предлагается подход, учитывающий также и основные технологические ограничения к поставленной задаче.

В следующем разделе будет приведена постановка задачи поиска оптимальной схемы размещения кустовых площадок и распределения скважин между ними при заданных ограничениях.

4. Постановка задачи. Задача кустования нефтяных скважин является частным случаем задачи группирования объектов при наличии ограничений [34]. При этом целевая функция представляет собой сумму расстояний между скважинами и основаниями кустов, к которым они принадлежат:

$$I = \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^{|S_k|} \left((x_i, y_i) - (x_c^k, y_c^k) \right)^2, \quad (1)$$

где K – количество кустов;

s_k – k -ый куст, содержащий $|s_k|$ скважин;

(x_i, y_i) – координаты i -ой скважин;

(x_c^k, y_c^k) – координаты кустовой площадки k -ого куста.

К основным ограничениям данной задачи, которые определяются сводом правил обустройства нефтяных месторождений [35], относятся:

- минимальное и максимальное допустимое количество скважин в кусте;
- максимальная величина отхода;
- минимально допустимое расстояние между двумя кустовыми площадками.

На данный момент, указанные выше ограничения, учитываются при помощи метода штрафных функций [36, 37], который преобразует исходную задачу с ограничениями в задачу безусловной оптимизации. Нарушение какого-либо из ограничений приводит к созданию штрафа, который добавляется к значению целевой функции.

В рамках данного исследования значение штрафа, обозначающая степень нарушения значений основных ограничений будет иметь следующий вид:

$$\varphi = \alpha \cdot \frac{V_{min} + V_{max} + V_{between} + V_{dist}}{K}, \quad (2)$$

где K – количество кустов;

V_{min} – количество кустов, у которых число скважин меньше, чем минимально-допустимое;

V_{max} – количество кустов, у которых число скважин больше, чем максимально-допустимое;

$V_{between}$ – количество кустов, нарушающих ограничение на минимально допустимое расстояние между двумя кустовыми площадками;

V_{dist} – количество кустов, имеющие скважины, нарушающих ограничение на максимальную величину отхода;

α – положительная величина, $\alpha \geq 1$.

Данная оптимизационная задача относится к категории NP трудных задач [38]. Основная проблема таких задач заключается в том, что они не могут быть решены за полиномиальное время. Следовательно, для крупных месторождений решение задачи кустования с помощью оптимизационных алгоритмов не гарантирует получение результата без нарушения указанных ограничений. Таким образом, возникает необходимость модификации существующих возможных подходов к решению данной задачи. В рамках данной статьи предлагается подход к обработке результатов работы оптимизационных методов на основе итеративного алгоритма устранения нарушения заданных ограничений.

5. Предлагаемое решение. Алгоритм выполняет корректировку взаимного расположения кустовых площадок на области месторождения с целью устранения возникших нарушений проектных ограничений, связанных с расположением кустовых площадок и скважин внутри них. Данный подход работает с проблемными кустами и их соседями. Под проблемным понимается куст, у которого нарушается хотя бы одно ограничение из следующего списка:

- минимальное и максимальное допустимое количество скважин в кусте;
- минимально допустимое расстояние между двумя кустовыми площадками.

Данный подход не обрабатывает случаи нарушения ограничения на величину отхода, поскольку выполнение остальных ограничений и правильно заданные пользователем параметры системы разработки автоматически исключают нарушение данного ограничения.

Для работы предлагаемого решения необходим следующий набор параметров:

- информация о расположении скважин;
- значения пользовательских ограничений;
- текущее положение кустовых площадок;
- информация по принадлежности скважин к кустовым площадкам;
- матрица расстояний между кустовыми площадками;
- матрица смежности кустовых площадок.

На основе данных параметров процесс устранения нарушения заданных ограничений может быть представлен в виде алгоритма корректировки положения проблемных кустовых площадок и их соседей. Псевдокод алгоритма представлен в алгоритме 1.

Алгоритм 1. Алгоритм корректировки положения кустовых площадок и их соседей

<p>Вход: информация о расположении скважин <i>wells</i>, пользовательские ограничения <i>rest</i>, текущее положение кустовых площадок <i>bushes</i>, информация по принадлежности скважин к кустовым площадкам <i>clusters</i>, матрица расстояний между кустовыми площадками <i>distance</i>, матрица смежности кустовых площадок <i>adj</i>, максимальное количество итераций <i>max_iter</i></p> <p>Выход: положение кустовых площадок <i>bushes</i>, удовлетворяющее пользовательским ограничениям</p> <p>Function EliminateClusterViolations(<i>wells, rest, bushes, clusters, distance, adj, max_iter</i>)</p> <p style="padding-left: 20px;"><i>iteration</i> ← 0</p> <p>▷ <i>current_best</i> – значение метрики для заданного <i>bushes</i> <i>current_best</i> ← TargetFunction(<i>bushes, rest, clusters</i>)</p> <p>▷ EstimateBestResult – процедура определения лучшего расположения кустовых площадок исходя из значения метрики <i>best</i> ← EstimateBestResult(<i>current_best, None</i>)</p> <p>▷ ChangePosition – процедура переопределения положения кустовых площадок исходя из центра масс скважин в каждом кусте <i>bushes</i> ← ChangePosition(<i>wells, bushes</i>)</p> <p>▷ <i>deque</i> – очередь проблемных кустов, у которых нарушения по количеству скважин</p> <p style="padding-left: 20px;">while True do</p> <p style="padding-left: 40px;">while len(<i>deque</i>) ≠ 0 do</p> <p style="padding-left: 60px;">▷ <i>intruder</i> – первый в очереди проблемный куст</p> <p>▷ <i>intruder.size</i> – количество скважин в кусте <i>intruder</i></p> <p>▷ <i>rest.min</i> – минимально-допустимое количество скважин в кусте</p> <p style="padding-left: 40px;">if <i>intruder.size</i> < <i>rest.min</i> then</p>

```

▷ EliminateMinCountWells – метод устранения нарушения на сверхмалое
число скважин.
    bushes ← EliminateMinCountWells(wells, rest, bushes, clusters,
adj, intruder)
▷ rest.max – максимально-допустимое количество скважин в кусте
    else if intruder.size > rest.max then
▷ EliminateMaxCountWells – метод устранения нарушения на сверхбольшое
число скважин
    bushes ← EliminateMaxCountWells(wells, rest, bushes, clusters,
adj, intruder)
    bushes ← ChangePosition(wells, bushes)
    current_best ← TargetFunction(bushes, rest, clusters)
    best ← EstimateBestResult(current_best, best)
    ▷ RecoveryCountClusters – процедура приведения числа кустов к
исходному
    bushes ← RecoveryCountClusters(bushes, rest, clusters)
    ▷ EliminateExtraNearbyBushes – метод устранения нарушения
сверхблизости кустов
    bushes ← EliminateExtraNearbyBushes(bushes, rest, adj, clusters)
    current_best ← TargetFunction(bushes, rest, clusters)
    best ← EstimateBestResult(current_best, best)
    ▷ best.count_violations – общее число нарушений у расположения
кустовых площадок
    if best.count_violations = 0 then
        break
    if iteration ≥ max_iter then
        break
▷ определение новой очереди проблемных кустов deque исходя из bushes
    iteration ← iteration + 1
return best
    
```

В качестве вспомогательных методов выступают:

- процедура расчета целевой функции TargetFunction, которая была описана в формуле (1);
- процедура оценки оптимальности полученного решения EstimateBestResult исходя из значения целевой функции;
- функция переопределения положения кустовых площадок ChangePosition, использующая расчет центра масс скважин;
- алгоритмы устранения нарушения на количество скважин в кусте: EliminateMinCountWells (алгоритм 2), EliminateMaxCountWells (алгоритм 3);
- процедура приведения количества кустовых площадок к заданному числу RecoveryCountWellPads (алгоритм 4);

– алгоритм устранения нарушения на сверхблизость кустовых площадок EliminateNearbyWellPads (алгоритм 5).

Алгоритм 2. Алгоритм устранения нарушения на сверхмалое количество скважин в кусте

Вход: информация о расположении скважин *wells*, пользовательские ограничения *rest*, текущее положение кустовых площадок *bushes*, информация по принадлежности скважин к кустовым площадкам *clusters*, матрица смежности кустовых площадок *adj*, номер проблемного куста *intruder* **Выход:** новое положение кустовых площадок *bushes*, в котором *intruder* не имеет нарушения

Function EliminateMinCountWells(*wells*, *rest*, *bushes*, *clusters*, *adj*, *intruder*)

```

▷ intruder.size – количество скважин в кусте intruder
  ▷ count_add – количество скважин, которые надо добавить к intruder
    count_add ← rest.min – intruder.size
  ▷ neighbours – список соседей куста intruder, у которых нет нарушения
сверхмалого числа скважин
  ▷ count_donor – количество скважин у соседей intruder, которые
возможно передать ему без нарушения ограничений
    count_donor ← – len(neighbours) * rest.min
  for i ← 0 to len(neighbours) – 1 do
    count_donor ← count_donor + neighbours[i].size
  if count_donor ≥ count_add then
    ▷ проблема решается изъятием скважин у соседей
    ▷ candidate_wells – список скважин кустов из neighbours
    for i ← 0 to len(candidate_wells) – 1 do
      if count_add = 0 then
        break
      ▷ index_bush – куст для candidate_wells[i] скважины
      if index_bush.size – rest.min ≥ 1 then
        ▷ скважина candidate_wells[i] принадлежит кусту intruder
        count_add ← count_add – 1
      ▷ переопределение положения куста intruder на основе центра масс
скважин
      else
        ▷ проблема решается объединением куста нарушителя с одним из
его соседей
        ▷ neighbours – список соседей куста intruder, у которых нет
нарушения сверхбольшого числа скважин
        ▷ index_bush – номер куста из neighbours, от которого минимальное
расстояние до intruder
        ▷ объединение кустов index_bush и intruder
        ▷ определение положения нового куста на основе центра масс
скважин
    return bushes

```

Алгоритм 3. Алгоритм устранения нарушения на сверхбольшое количество скважин в кусте

Вход: информация о расположении скважин *wells*, пользовательские ограничения *rest*, текущее положение кустовых площадок *bushes*, информация по принадлежности скважин к кустовым площадкам *clusters*, матрица смежности кустовых площадок *adj*, номер проблемного куста *intruder* **Выход:** новое положение кустовых площадок *bushes*, в котором *intruder* не имеет нарушения

Function EliminateMaxCountWells (*wells, rest, bushes, clusters, adj, intruder*)

▷ *intruder.size* – количество скважин в кусте *intruder*
 ▷ *count_sub* – количество скважин, которые надо добавить к *intruder*
 $count_sub \leftarrow intruder.size - rest.max$
 ▷ проблема решается задачей скважин куста *intruder* его соседям
 ▷ *recipient_wells* – отсортированный список скважин куста *intruder* по возрастанию расстояния до кустовой площадки
for *i* ← 0 **to** $len(recipient_wells) - 1$ **do**
 if *count_sub* = 0 **then**
 break
 ▷ *neighbours* – список соседей куста *intruder*, у которых нет нарушения сверхбольшого числа скважин
 ▷ *recipient_wells[i].distance* – расстояние от скважины до кустовой площадки *intruder*
 ▷ *candidate_owner* – ближайший из списка соседей *neighbours* к скважине *recipient_wells[i]*
 ▷ *distance* – расстояние от *candidate_owner* до *recipient_wells[i]*
 if *distance* < 1.1 * *recipient_wells[i].distance* **then**
 ▷ скважина *recipient_wells[i]* принадлежит кусту *candidate_owner*
 $count_sub \leftarrow count_sub - 1$
 if *intruder.size* > *rest.max* **then**
 ▷ проблема решается разделением куста *intruder* на два отдельных куста
 ▷ С – центр масс куста
 ▷ D – наиболее удаленная скважина от С
 ▷ Расчет уравнения прямой CD
 ▷ Расчет уравнения перпендикуляра прямой CD, проходящего в точке С
 ▷ На основании уравнения перпендикуляра к CD разделение скважин на две группы.
 ▷ В каждой группе расчет положения кустовой площадки на основе центра масс скважин
return *bushes*

После выполнении алгоритмов устранения нарушения на сверхбольшое и сверхмалое количество скважин в кусте не исключено, что количество кустов на месторождении может отличаться от заданного. На этот случай, если для пользователя очень важным является установленное значение количества кустов, была разработана процедура приведения количества кустовых площадок к заданному. Предлагаемый подход решает проблему несоответствия текущего числа кустов и заданного. Его псевдокод представлен в алгоритме 4.

Алгоритм 4. Процедура приведения количества кустовых площадок к заданному

Вход: заданное число кустовых площадок $original_N$, текущее число кустовых площадок $current_N$, текущее положение кустовых площадок $bushes$, матрица смежности кустовых площадок adj

Выход: новое положение кустовых площадок $bushes$, соответствующее заданному количеству кустов

Function RecoveryCountWellPads ($original_N, current_N, bushes, adj$)

$count \leftarrow original_N - current_N$

if $count > 0$ **then**

▷ проблема решается добавлением новых кустов

▷ $graph$ – неориентированный граф на основе матрицы смежности

adj

▷ Поиск в $graph$ циклов, каждый из которых имеет минимум 4 вершины и не содержит вершин внутри себя

▷ $cycles$ – список циклов, найденных в $graph$

if $len(cycles) < count$ **then**

вершин

▷ для каждого цикла вычисляется его центр масс координат его

▷ $mas_centers$ – пустой список, размерности $len(cycles)$

for $i \leftarrow 0$ **to** $len(cycles) - 1$ **do**

▷ $position$ – центр масс координат вершин $cycles[i]$

$mas_centers[i] \leftarrow position$

▷ $mas_centers$ – список, каждый элемент которого центр масс соответствующего цикла из $cycles$

for $i \leftarrow 0$ **to** $count - len(cycles) - 1$ **do**

месторождении

▷ $position$ – случайно сгенерированное положение куста на

▷ к $mas_centers$ добавляется $position$

else

▷ для каждого цикла вычисляется показатель целесообразности добавления в центре него новой кустовой площадки по формуле 2

▷ сортировка списка $cycles$ по убывания показателя целесообразности (формула 2)

▷ $mas_centers$ – пустой список, размерности $count$

for $i \leftarrow 0$ **to** $count - 1$ **do**

▷ $position$ – центр масс координат вершин $cycles[i]$

$mas_centers[i] \leftarrow position$

▷ UnionLists – функция объединения двух или более списков
 $bushes \leftarrow UnionLists(bushes, mas_centers)$

else

▷ проблема решается удалением лишних кустов

▷ для каждого куста вычисляется показатель значимости кустовой площадки по формуле 3

▷ сортировка списка $bushes$ по возрастанию показателя значимости (формула 3)

for $i \leftarrow 0$ **to** $1 - count$ **do**

▷ из $bushes$ удаляем первый элемент

return $bushes$

В рамках представления процедуры приведения количества кустовых площадок к заданному были предложены критерии отбора циклов вершин и кустовых площадок.

Показатель целесообразности добавления в центре его новой кустовой площадки имеет следующий вид:

$$metrics_{cycle} = \frac{1}{n+1} \sum_{i=1}^n size_i, \quad (3)$$

где n – число кустов в цикле;

$size_i$ – количество скважин в i -ом кусте цикла.

Показатель значимости кустовой площадки для нефтяного месторождения в рамках отсеивания лишних кустов определяется следующим образом:

$$metrics_{bush} = \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n size_i + size_j \right), \quad (4)$$

где j – номер куста;

n – число соседей j -го куста;

$size_j$ – количество скважин в j -ом кусте цикла.

Следующая компонента предлагаемого подхода решает проблему сверхблизости кустов. Данная проблема решается двумя способами:

- процедура взаимного отталкивания проблемных кустов до приемлемого расстояния между ними;
- процедура определения нового положения проблемных кустов.

Предлагаемый алгоритм вначале опирается на первую процедуру и в случае нарушения сверхблизости кустов с соседями запускает вторую процедуру. Во второй процедуре используется расстояние Хаусдорфа [39]. Псевдокод данной компоненты представлен в алгоритме 5.

Алгоритм устранения нарушения на сверхблизость кустовых площадок строится на использовании области для размещения пары кустов без нарушения ограничений. Данная область представляет собой геометрическое место точек, в котором расстояние от кустов из списка соседей текущей пары проблемных кустов для каждой точки будет больше, чем минимально-допустимое расстояние между парой кустовых площадок *distance*. Зачастую без дополнительных

ограничений такая область будет не применима для дальнейшего использования в силу своей неограниченности.

Для пресечения описанного выше случая используются следующие дополнительные ограничения:

- любая точка должна быть в пределах области месторождения;

- пусть два куста P и Q из списка соседей являются соседями между собой, а расстояние PQ больше, чем $2 * distance$. C – середина отрезка между кустовыми площадками текущей пары проблемных кустов. Тогда, при разделении плоскости прямой PQ , любая точка из ГМТ должна быть в той же полуплоскости, что и вершина C .

Алгоритм 5. Алгоритм устранения нарушения на сверхблизость кустовых площадок

Вход: информация о расположении скважин *wells*, пользовательские ограничения *rest*, текущее положение кустовых площадок *bushes*, информация по принадлежности скважин к кустовым площадкам *clusters*, матрица смежности кустовых площадок *adj*

Выход: новое положение кустовых площадок *bushes*, без нарушения на сверхблизость кустовых площадок

Function EliminateNearbyWellPads (*wells, rest, bushes, clusters, adj*)

▷ *deque* – очередь проблемных пар кустов, у которых нарушения на сверхблизость

while len(*deque*) ≠ 0 **do**

▷ *tuple* – текущая пара проблемных кустов

▷ A и B – координаты кустов из *tuple*

$C \leftarrow (A+B)/2$

▷ e – единичный вектор прямой AB

▷ расчет положения точек D и E на прямой AB

▷ *rest.distance* – минимально-допустимое расстояние между парой кустовых площадок

$D \leftarrow C + e * rest.distance/2$

$E \leftarrow C - e * rest.distance/2$

▷ *neighbours* – все соседние кусты для A и B , исходя из матрицы смежности *adj*

▷ расчет все расстояний *mas_distances* от D и E до кустов из *neighbours*

▷ All – оператор and для булевой последовательности

if All(*mas_distance* ≥ *rest.distance*) **then**

▷ точки D и E – новые положения кустов A и B

else

▷ расчет области *region*, в которой можно разместить кустовые площадки из текущей пары без нарушения ограничения

▷ *points* – список точек границы *region*

```

for  $i \leftarrow 0$  to  $\text{len}(\text{points}) - 1$  do
    ▷ расчет расстояния Хаусдорфа  $\text{distance}$  между  $\text{points}[i]$  и
    границей  $\text{region}$ 
    if  $\text{distance} \geq \text{rest.distance}$  then
         $R \leftarrow \text{points}[i]$ 
        ▷ точка  $T$  – точка на границе  $\text{region}$ ,  $|RT| = \text{distance}$ 
        break
     $S \leftarrow (R+T)/2$ 
    ▷  $e$  – единичный вектор прямой  $RT$ 
    ▷ расчет положения точек  $X$  и  $Y$  на прямой  $RT$ 
     $X \leftarrow S + e * \text{rest.distance}/2$ 
     $Y \leftarrow S - e * \text{rest.distance}/2$ 
    ▷ точки  $X$  и  $Y$  – новые положения кустов  $A$  и  $B$ 
return  $\text{bushes}$ 
    
```

Пример такой области с дополнительными ограничениями представлен на рисунке 1.

После завершения описания предложенного подхода отдельных пояснений требует способ нахождения матрицы смежности кустовых площадок. Итеративная схема используемой в работе процедуры расчета матрицы смежности кустовых площадок представлена ниже.

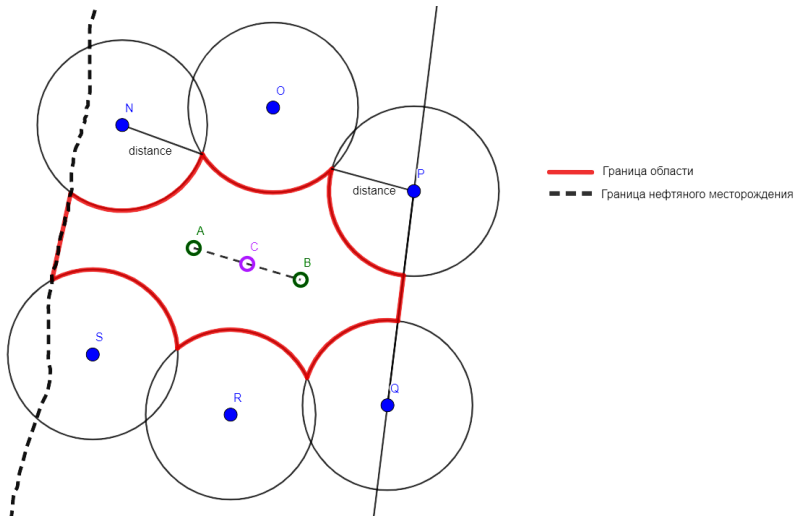


Рис. 1. Пример области, в которую можно разместить пару кустовых площадок

Шаг 1: Расчет матрицы расстояний между кустовыми площадками *distance*, у которой каждый элемент рассчитывается следующим образом:

$$distance_{i,j} = \left| (x_c^i, y_c^i) - (x_c^j, y_c^j) \right|, \quad i, j \in [1, K], \quad (5)$$

где *K* – количество кустов;

(x_c^i, y_c^i) – координаты кустовой площадки *i*-ого куста.

Шаг 2: Расчет расстояния между кустовыми площадками и их самыми удаленными скважинами (Далее – радиус зоны влияния куста) *radius*:

$$radius_i = \max_l \left| (x_c^i, y_c^i) - (x_l, y_l) \right|, \quad i \in [1, K], \quad (6)$$

где *K* – количество кустов;

(x_c^i, y_c^i) – координаты кустовой площадки *i*-ого куста;

(x_l, y_l) – координаты *l*-ой скважины, $l \in [1, |S_i|]$;

S_i – *i*-ый куст, содержащий $|S_i|$ скважин.

Шаг 3: Обход каждой пары кустов. Если *condition* (7) больше или равен 0, то пара кустов *i* и *j* являются соседями, в ином случае пара кустов *i* и *j* не являются соседями.

$$condition = radius_i + radius_j - \lambda \cdot distance_{i,j}, \quad (7)$$

где *radius_i* – радиус зоны влияния *i*-го куста;

distance_{i,j} – расстояние между *i*-ой и *j*-ой кустовыми площадками;

λ – поправочный коэффициент, $\lambda \in (0, 1)$ (В рамках исследования авторами использовался λ равным 0.83).

В целом после завершения Шага 3 процедура находит матрицу смежности кустовых площадок. Но такая матрица смежности зачастую не удовлетворяет условию планарности (рисунок 2), которое необходимо для адекватной работы следующего этапа автоматизации процесса проектирования разработки нефтяного месторождения, а именно планирования ввода в эксплуатацию месторождения. Поэтому далее описана

часть процедуры, посвященная приведению графа, построенного на основе матрицы смежности, к планарному.

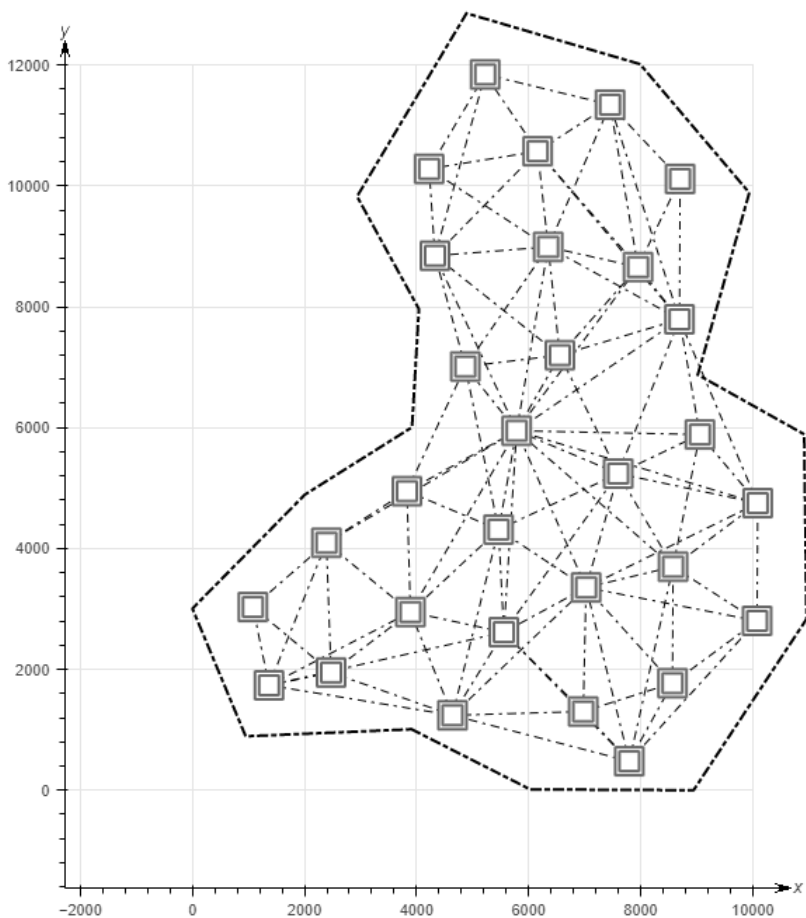


Рис. 2. Пример работы процедуры нахождения матрицы смежности

Шаг 4: Обход по всем кустам. Для i -ого куста $neighbours$ – список его соседей.

Шаг 5: Обход по всем соседям i -ого куста. $common_neighbors$ – список общих соседей i -ого и $neighbours_j$ кустов. Далее i -ый куст будет именоваться A , а $neighbours_j$ куст – B .

Шаг 6: Расчет расстояния между кустами A и B .

Шаг 7: Обход всех общих соседей кустов A и B . Текущий общий сосед кустов A и B будет именоваться C . Расчет расстояний AC и BC .

Шаг 8: Если угол напротив стороны AB больше или равен 90 градусов (косинус угла напротив стороны AB value (8) меньше или равен 0), то для пары i -ого и $neighbours_j$ кустов завершается обход их общих соседей. Переход к шагу 9. Иначе переход к шагу 5.

$$\text{value} = \frac{BC^2 + AC^2 - AB^2}{2 \cdot BC \cdot AC}. \quad (8)$$

Шаг 9: Если у куста A или куста B нет скважин, то переход к шагу 5.

Шаг 10: Расчет полигональных структур вокруг скважин куста A и скважин куста B .

Шаг 11: Пусть будет построен отрезок между кустами A и B . Тогда точка P – пересечение отрезка AB и полигональной структуры куста A , а точка Q – пересечение отрезка AB и полигональной структуры куста B .

Шаг 12: Расчет расстояния между кустом A и точкой P . Расчет расстояния между точкой Q и кустом B .

Шаг 13: Расчет отношения $ratio$ между длинами сторон PQ и AB .

Шаг 14: Если длина $AP < radius_i$ и длина $QB < radius_j$, то переход к шагу 14. Иначе переход к шагу 15.

Шаг 15: Точки P и Q находятся внутри соответственно зон влияния кустов A и B . Если $ratio \geq 0.15$, то необходимо удалить связь между i -ым и $neighbours_j$ кустами. Переход к шагу 4.

Шаг 16: Как минимум одна из точек P и Q находится за пределами зоны влияния своего куста. Если $ratio \geq 0.13$, то необходимо удалить связь между i -ым и $neighbours_j$ кустами. Переход к шагу 4.

Используемые пороговые значения для коэффициента $ratio$ в шагах 15 и 16 процедуры нахождения матрицы смежности кустовых площадок были установлены опытным путем в процессе настройки работы процедуры.

6. Численные эксперименты. Для исследования разработанного алгоритма корректировки положения кустовых площадок была разработана следующая схема:

– Подготовка тестовых нефтяных месторождений для проведения исследования;

– Размещение кустовых площадок с использованием оптимизационного алгоритма на тестовых месторождениях. Фиксация результатов размещения;

– Запуск разработанного алгоритма на основе каждого сохраненного результата размещения кустовых площадок при помощи оптимизационного алгоритма. Фиксация результатов корректировки положения кустов.

В рамках создания тестовых нефтяных месторождений будут рассмотрены разные геометрические фигуры, потенциально охватывающие большую часть спектра возможных конфигураций залежей углеводородного сырья. Для подготовки тестовых нефтяных месторождений был определен список характерных признаков, комбинации которых формируют возможные конфигурации залежей:

- неправильная форма контура;
- вытянутая форма контура;
- залежь с обширной зоной отсутствия коллектора;
- несколько несвязанных блоков залежи.

Всего для эксперимента было подготовлено три синтетических тестовых нефтяных месторождения, ключевые характеристики которых представлены в таблице 1. Внешний вид тестовых месторождений продемонстрирован на рисунках 3 – 5.

Особенностью первого месторождения является наличие 5 разведочных ранее пробуренных скважин, которые не подлежат объединению в кусты и, соответственно, не участвуют в процессе кустования. Особенностью же последнего месторождения является горизонтальный тип скважин. Длина ствола и азимут составляют 450 м и 65 градусов соответственно.

Таблица 1. Характеристики тестовых месторождений

Характеристики	Номер тестового месторождения		
	1	2	3
Площадь (км ²)	172.03	76.04	368.92
Количество залежей	2	4	1
Количество добывающих скважин	352	322	386
Количество нагнетательных скважин	169	303	373
Общее количество скважин	521	625	759
Тип сетки скважин	обращенная семиточечная	обращенная пятиточечная	шахматная рядная
Тип скважин	вертикальный	вертикальный	горизонтальный
Расстояние между скважинами (м)	600	500	700

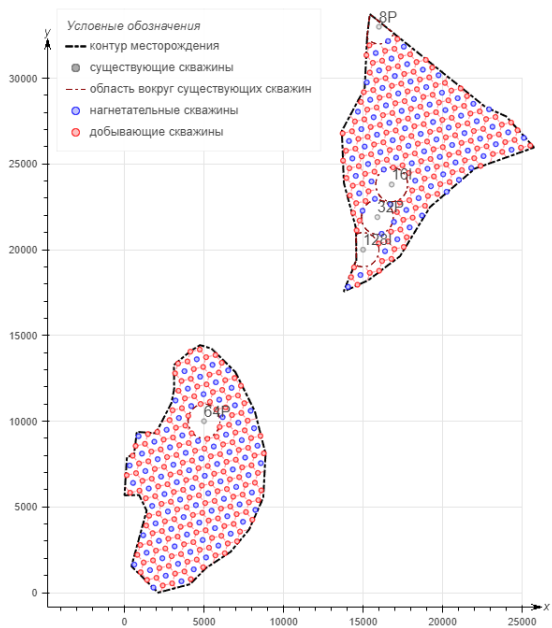


Рис. 3. Схема представления первого синтетического месторождения

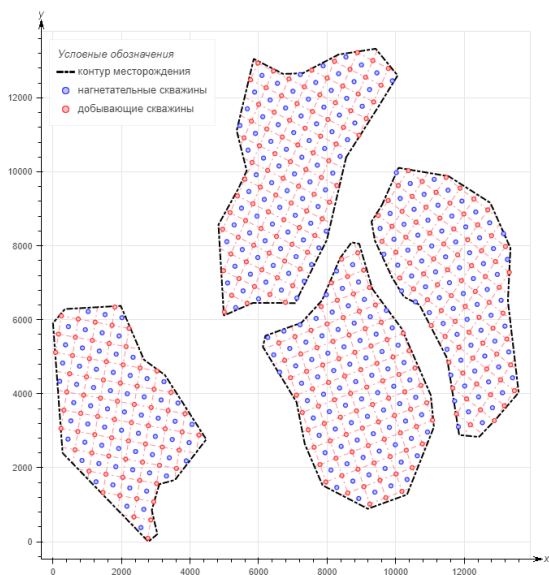


Рис. 4. Схема представления второго синтетического месторождения

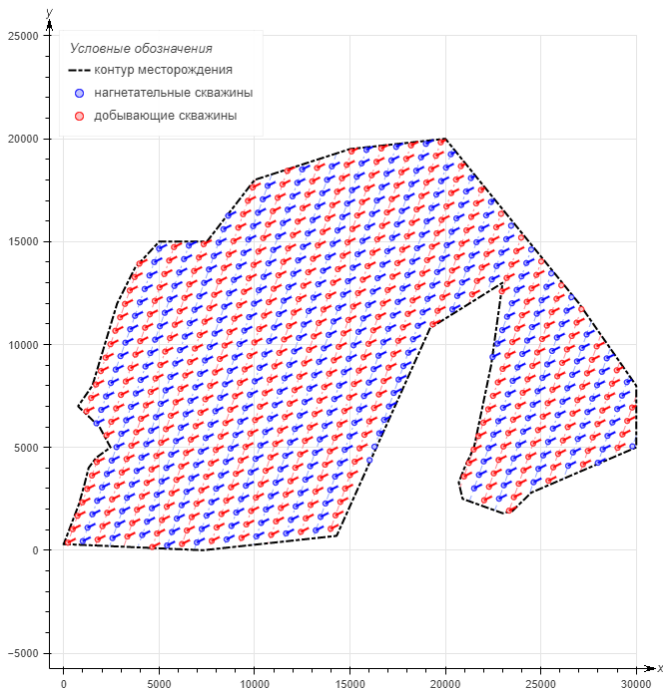


Рис. 5. Схема представления третьего синтетического месторождения

Следующим этапом необходимо запустить задачу размещения кустовых площадок и скважин между ними при помощи глобального метода оптимизации. Для этого необходимо определиться со значениями основных ограничений, а также с методом глобальной оптимизации. В качестве алгоритма глобальной оптимизации был выбран метод роя частиц, который успешно применяется при решении прикладных задач [40 – 42].

Чтобы ограничить использование вычислительных ресурсов при решении задач оптимизации требуется ввести понятия мощности оптимизации N_{max} . Данное понятие обозначает максимальное количество запусков целевой функции. Для популяционных алгоритмов мощность оптимизации можно определить следующим образом:

$$N_{max} = NP \cdot Iter_{max}, \quad (9)$$

где NP – размер популяции;

$Iter_{max}$ – количество поколений.

В рамках данной задачи, целевая функция описана в формуле (2). В качестве входных параметров выступают координаты по осям X и Y размещаемых кустовых площадок. Следовательно, размер популяции оптимизационного алгоритма для решения поставленной задачи будет равен удвоенному числу кустовых площадок.

Отношение размера популяции и количества поколений в рамках данного исследования будет величиной постоянной и будет равно один к двум. Таким образом, выбрав значение мощности оптимизации для размещения m кустовых площадок, автоматически определяется размер популяции и количество поколений.

Далее требуется определить значения основных ограничений, которые представлены ниже:

- минимальное допустимое количество скважин в кусте – 10;
- максимальное допустимое количество скважин в кусте – 24;
- максимальная величина отхода – 2500 м.;
- минимально допустимое расстояние между двумя кустовыми площадками – 1000 м.

Сравнение результатов работы оптимизационного алгоритма и разработанного алгоритма корректировки положения кустовых площадок после выполнения оптимизационного алгоритма будет проводиться на основе анализа величины штрафа, которая обозначает степень нарушения значений основных ограничений.

Стоит отметить, что для сравнения берется величина штрафа до умножения на α . Такая величина состоит из среднего арифметического числа кустов по каждому из нарушений ограничений. Но, при этом один и тот же куст не может иметь одновременно нарушения на сверхмалое и на сверхбольшое число скважин. Следовательно, допустимый диапазон величины штрафа будет равен $[0, 3]$.

Для каждого тестового месторождения были определены количество кустовых площадок, которые необходимо разместить, и перечень принимаемых значений мощности оптимизации. Данные показатели представлены в таблице 2. Для каждого выбранного значения мощности оптимизации было определено число реализаций равное 50.

Таблица 2. Количественные показатели для оптимизационной задачи

Показатели	Номер тестового месторождения		
	1	2	3
Количество кустовых площадок	25	30	35
Минимальное принимаемое значение для мощности оптимизации	4000	4800	5600
Максимальное принимаемое значение для мощности оптимизации	84000	100800	117600
Шаг для мощности оптимизации	10000	12000	14000

Для проведения исследований в рамках публикации использовался программный продукт, разработанный авторами [43]. Эксперимент проводился на ЭВМ с ОП Windows со следующими характеристиками:

- ОЗУ: 32 Гб;
- количество ядер: 8;
- тактовая частота: 3700 Ггц.

Результаты экспериментов представлены в таблицах 3 – 5. Визуализация данных в таблицах представлена на рисунках 6 – 8.

Таблица 3. Значения штрафа для первого тестового месторождения

	Значения мощности оптимизации								
	4000	14000	24000	34000	44000	54000	64000	74000	84000
метод оптимизации									
min	1	0,6	0,44	0,48	0,44	0,28	0,48	0,48	0,4
median	1,28	0,9	0,78	0,68	0,72	0,7	0,76	0,64	0,72
mean	1,26	0,91	0,77	0,72	0,75	0,68	0,75	0,68	0,73
max	1,56	1,2	1,04	1,08	1,08	0,96	1,04	1,08	1,08
sd	0,12	0,15	0,14	0,14	0,14	0,16	0,15	0,14	0,14
метод оптимизации с алгоритмом корректировки положения кустовых площадок									
min	0	0	0	0	0	0	0	0	0
median	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0	0,04
mean	0,04	0,04	0,04	0,03	0,03	0,04	0,04	0,03	0,03
max	0,2	0,2	0,16	0,24	0,12	0,2	0,16	0,12	0,16
sd	0,05	0,04	0,04	0,05	0,03	0,05	0,05	0,04	0,04

Таблица 4. Значения штрафа для второго тестового месторождения

	Значения мощности оптимизации								
	4800	16800	28800	40800	52800	64800	76800	88800	100800
метод оптимизации									
min	0,5	0,23	0,07	0,1	0,07	0,07	0,1	0,07	0,07
median	0,7	0,4	0,27	0,23	0,2	0,2	0,2	0,2	0,17
mean	0,7	0,39	0,27	0,22	0,19	0,21	0,2	0,2	0,16
max	0,9	0,57	0,4	0,37	0,4	0,37	0,33	0,43	0,37
sd	0,08	0,08	0,08	0,05	0,07	0,07	0,06	0,07	0,07
метод оптимизации с алгоритмом корректировки положения кустовых площадок									
min	0	0	0	0	0	0	0	0	0
median	0	0	0	0	0	0	0	0	0
mean	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01
max	0,07	0,13	0,1	0,13	0,1	0,17	0,07	0,17	0,07
sd	0,02	0,03	0,02	0,03	0,02	0,04	0,02	0,03	0,02

Таблица 5. Значения штрафа для третьего тестового месторождения

	Значения мощности оптимизации								
	5600	19600	33600	47600	61600	75600	89600	103600	117600
метод оптимизации									
min	0,83	0,37	0,26	0,23	0,17	0,11	0,14	0,14	0,14
median	0,97	0,66	0,43	0,37	0,34	0,29	0,29	0,29	0,29
mean	0,97	0,65	0,44	0,37	0,33	0,31	0,28	0,3	0,29
max	1,14	0,91	0,74	0,6	0,51	0,49	0,46	0,43	0,54
sd	0,08	0,11	0,09	0,07	0,07	0,08	0,07	0,07	0,08
метод оптимизации с алгоритмом корректировки положения кустовых площадок									
min	0	0	0	0	0	0	0	0	0
median	0,03	0,03	0	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
mean	0,03	0,03	0,02	0,02	0,03	0,03	0,03	0,03	0,02
max	0,11	0,14	0,14	0,11	0,17	0,17	0,11	0,2	0,09
sd	0,03	0,03	0,03	0,03	0,04	0,04	0,03	0,04	0,02

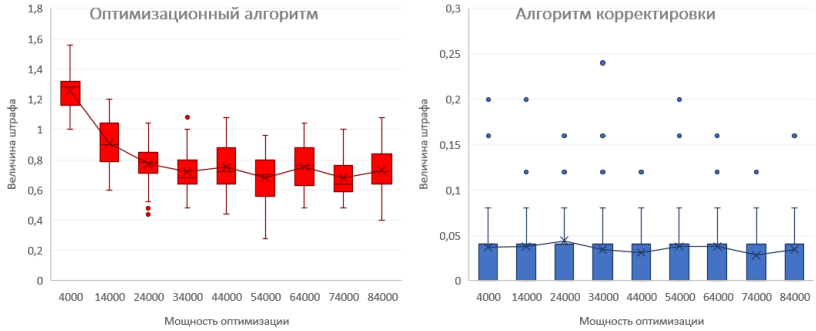


Рис. 6. Зависимость величины штрафа от мощности оптимизации (1-ое месторождение)

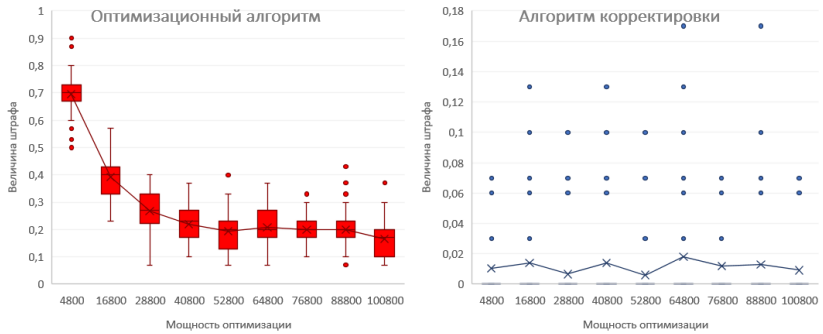


Рис. 7. Зависимость величины штрафа от мощности оптимизации (2-ое месторождение)

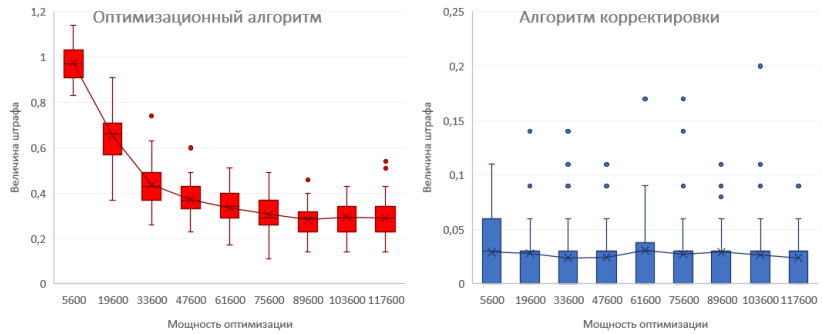


Рис. 8. Зависимость величины штрафа от мощности оптимизации (3-ое месторождение)

7. Обсуждение и выводы. В рамках решения задачи размещения кустовых площадок на нефтяном месторождении было проведено сравнение работоспособности оптимизационного алгоритма метода роя частиц и надстройки над ним, представляющее собой алгоритм корректировки положения кустовых площадок. Для проведения эксперимента были подготовлены три тестовых синтетических нефтяных месторождения. Сравниваемым показателем являлась величина штрафа за нарушение основных ограничений задачи.

Была введена мощность оптимизации, понятие, которое ограничивает вычислительные возможности метода оптимизации. Для каждого тестового месторождения была определена последовательность принимаемых значений этого параметра, и относительно них был проведен запуск рассматриваемых подходов. Полученные результаты были представлены в табличном и графическом форматах.

На приведенных графиках для визуализации результатов была выбрана диаграмма «ящик с усами», которая отлично демонстрирует значения медианы и математического ожидания, минимальные и максимальные значения, а также отображает выбросы. Таким образом, для каждого принимаемого значения мощности оптимизации на графике приводятся соответствующие статические показатели относительно величины штрафа.

Применение оптимизационного подхода для всех тестовых нефтяных месторождений не позволило получить решение, удовлетворяющее пользовательским ограничениям в рамках поставленной задачи. Предложенный в рамках данной статьи алгоритм в большинстве случаев находит оптимальное решение без нарушения заданных ограничений.

Полученные результаты можно связать с тем, что представленное решение является надстройкой над оптимизационным методом. Алгоритм корректировки использует в качестве входной информации расположение кустовых площадок, которое определяется в ходе работы метода оптимизации. В силу случайного характера размещения кустовых площадок метод оптимизации может генерировать решения, при которых устранение нарушений либо невозможно, либо будет требовать больших вычислительных ресурсов. Примеры некоторых таких ситуаций:

– кустовая площадка находится за пределами месторождения и не имеет соседей;

- кустовая площадка и ее соседи имеют нарушения по ограничению максимального числа скважин;
- кустовая площадка и ее соседи имеют нарушения по ограничению минимального числа скважин.

В целом сложившуюся проблему можно решить двумя способами:

- замена оптимизационного подхода на другие решения;
- создание нового самостоятельного алгоритма размещения кустовых площадок.

Новое решение данной задачи может заключаться в представлении её в виде задачи упаковки.

Также возможна замена текущего метода роя частиц другими оптимизационными подходами, позволяющие решать задачи условной оптимизации.

8. Заключение. В рамках данного исследования был предложен алгоритм корректировки положения кустовых площадок при решении задачи разработки нефтяных месторождений.

Предлагаемый подход основан на идеи изменения взаимного расположения кустовых площадок на области месторождения, с целью устранения нарушений проектных ограничений, связанных с планированием месторождения. В качестве входных данных предложенное решение использует результат размещения кустовых площадок, который был получен при помощи метода оптимизации. В целом за счет использования данного подхода при разработке месторождения может быть достигнут результат, при котором количество скважин для каждого из кустов будет в пределах допустимых нормативов, а расстояние между кустами – не меньше заданного.

В рамках численных экспериментов были сформированы синтетические месторождения, которые отличаются друг от друга геометрией, количеством залежей и конфигурацией сетки скважин. На них было проведено размещение кустовых площадок при помощи алгоритма оптимизации «метод роя частиц». Следующим шагом был запущен алгоритм корректировки положения кустовых площадок. Таким образом, выполнялось сравнение штрафного показателя после завершения работы оптимизационного метода и предлагаемого подхода. В ходе анализа полученных результатов были сделаны выводы о том, что предложенный алгоритм в большинстве случаев может справляться с поставленной задачей.

В дальнейшем в рамках решения данной задачи планируется внедрение представленного подхода в сам процесс решения

оптимизационной задачи как дополнительный этап, позволяющий выполнять коррекцию найденных решений под имеющиеся ограничения. Другое возможное направление исследований в рамках решения задачи автоматизации процесса проектирования разработки нефтяных месторождений будет заключаться в формировании новой методологии размещения кустовых площадок без использования глобальных оптимизационных алгоритмов.

Литература

1. Кутузова М. Катастрофа с надеждой на будущее // Нефть России. 2016. № 11–12. С. 28–31.
2. Нефтянка, шаг вперед. Справится ли Россия? URL: <https://teknoblog.ru/2017/01/08/73260>. (дата обращения: 10.10.2022).
3. Баскова М.Л. Анализ развития нефтяной отрасли России // NovaInfo.Ru. 2015. № 33. С. 76–81.
4. Фрай М.Е. Оценка современного состояния нефтяной промышленности России // Вестник Удмуртского университета. Серия «Экономика и право». 2015. № 2. С. 75–85.
5. Эдер Л.В., Филимонова И.В., Проворная И.В., Мамахатов Т.М. Состояние нефтяной промышленности России: добыча, переработка, экспорт // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. 2016. № 6. С. 41–51.
6. Yergin D. The Prize: The Epic Quest for Oil, Money, and Power // Simon & Schuster. 1990. 887 p.
7. Prodromou T., Demirel R. Oil Price shock and cost of capital: Does market liquidity play a role? // Energy Economics. 2022. pp. 1–39.
8. Al Jabri S., Raghavan M., Vespignami J. Oil prices and fiscal policy in an oil-exporter country: Empirical evidence from Oman // Energy Economics. 2022. vol. 111. pp. 1–33.
9. Черная полоса Господству нефти в мире приходит конец. В 2020-м она получила удар, от которого может не оправиться. URL: <https://lenta.ru/articles/2020/12/30/petroleum/>. (дата обращения: 10.10.2022).
10. Воробьев А.Е., Воробьев К.А., Тчаро Х. Цифровизация нефтяной промышленности // Изд-во «Спутник+». 2018. 327 с.
11. Пескова Д.Р., Ходковская Ю.В., Шарафутдинов Р.Б. Цифровизация бизнес-процессов в нефтегазовых компаниях // Евразийский юридический журнал. 2018. № 9. С. 438–444.
12. Тчаро Х., Воробьев А.Е., Воробьев К.А. Цифровизация нефтяной промышленности: базовые подходы и обоснование «интеллектуальных» технологий // Вестник Евразийской науки. 2018. № 2. С. 1–17.
13. Абасова Х.А. Характеристика финансовых рисков и их особенности в нефтяной промышленности // Финансы и кредит. 2013. № 9. С. 61–68.
14. Ващук Д.О., Курочкин Е.С., Беломестнов А.В. Цифровизация нефтегазовой промышленности // Инновационный потенциал цифровой экономики: Сб. научн. статей Междунар. науч.-практ. конф. (г. Курск, 28 октября 2021 г.). Курск: ЮЗГУ, 2021. С. 79–82.
15. Козлова Д. Перспективы и барьеры цифровой трансформации нефтегазового комплекса России // Нефтегазовая вертикаль: Спецвыпуск. Аналитическое обозрение «Вектор». 2018. № 15–16. С. 19–26.

16. Козлова Д.В., Пигарев Д.Ю. Интеллектуальная добыча почему России необходимо изменить подход к государственному стимулированию отрасли. // *Neftegaz.Ru*. 2018. № 7. С. 32–39.
17. Tariq Z., Aljawad M.S., Hasan A., Murtaza M., Mohammed E., El-Husseine A., Alarif S.A., Mahmoud M., Abdurraheem A. A systematic review of data science and machine learning applications to the oil and gas industry // *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*. 2021. no. 11. pp. 4339–4374.
18. Sircar A., Yadav K., Rayavarapu K., Bist N., Oza H. Application of machine learning and artificial intelligence in oil and gas industry // *Petroleum Research*. 2021. no. 6. pp. 379–391.
19. Hanga K.M., Kovalchuk Y. Machine learning and multi-agent systems in oil and gas industry applications: A survey // *Computer Science Review*. 2019. vol. 34. pp. 1–17.
20. Куст скважин. URL: <https://proektirovanie.gazprom.ru/about/subsidiaries/47/>. (дата обращения: 10.10.2022).
21. Силкина Т.С., Сахимова Э.Э., Лямина Н.Ф., Саушин А.З. Анализ высокотехнологичного метода добычи нефти с использованием уплотняющей сетки при бурении новой скважины в сложной кустовой системе // *Новейшие технологии освоения месторождений углеводородного сырья и обеспечение безопасности экосистем Каспийского шельфа: Материалы XII Междунар. науч.-практ. конф. (г. Астрахань, 3 сентября 2021 г.)*. Астрахань: АГТУ, 2021. С. 62–65.
22. Liu G., Wang G., Zhao Z., Ma F. A new pattern of cluster-layout for deep geothermal reservoirs: Case study from Dezhou geothermal field, China // *Renewable Energy*. 2020. pp. 484–499.
23. Kheirollahi H., Chahardowli M., Simjoo M. A new method of well clustering and association rule mining // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2022. vol. 214.
24. Abramov A. Optimization of well pad design and drilling – well clustering // *Petroleum Exploration and Development*. 2019. no. 3. pp. 614–620.
25. Арбузов В.Н. Эксплуатация нефтяных и газовых скважин Часть 1 // Изд-во ТПУ. 2011. 200 с.
26. Лошаков Д.С., Васильев С.И., Милосердов Е.Е., Ганиев Д.Ф., Герлинский П.В. Проблемы обустройства кустовых оснований при наличии многолетних мерзлых пород // *Горная промышленность*. 2016. № 6. С. 74–75.
27. Денисов П.Г. Сооружение буровых // *М: Недра*. 1989. 397 с.
28. Богаткина Ю.Г., Еремин Н.А., Лындин В.Н. Особенности бурения и формирования затрат в строительстве нефтегазовых скважин кустовым методом Ханты-Мансийского АО // *Проблемы экономики и управления нефтегазовым комплексом*. 2021. № 10. С. 5–9.
29. Ермолаев А.И., Кувичко А.М., Соловьев В.В. Модели и алгоритмы размещения кустовых площадок и распределения скважин по кустам при разработке нефтяных и газовых месторождений // *Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности*. 2011. № 9. С. 29–32.
30. Можиль А.Ф., Третьяков С.В., Дмитриев Д.Е., Гильмутдинова Н.З., Есипов С.В., Карачев А.А. Техничко-экономическая оптимизация кустования скважин при интегрированном концептуальном проектировании // *Нефтяное хозяйство*. 2016. № 4. С. 126–129.
31. Robertson E., Iyer N., Klenner R.C.L., Liu G. Optimization of unconventional well-pad area using reservoir simulation and intelligent sequential sampling // *Unconventional Resources Technology Conference*. 2017. pp. 1–12.

32. Kheirollahi H., Chahardowli M., Simjoo M. A new method of well clustering and association rule mining // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2022. vol. 214. DOI: 10.15530/urtec-2017-2673695.
33. Шатровский А.Г., Чинаров А.С., Салихов М.Р. Группирование проектных скважин для размещения кустовых площадок на примере многопластового месторождения // *ПРОНЕФТЬ. Профессионально о нефти*. 2020. №3. С. 44–49.
34. Kulakov E.D., Mikhalev A.S., Kuznetsov A.S., Sarenkov A.V., Shutalev A.D., Gorokhov A.P., Fedoreev A.E. Planning development automation of oil fields // *AIP Conference Proceedings* 2402. 2021. pp. 1–13.
35. Обустройство нефтяных и газовых месторождений. Требования пожарной безопасности. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200122146>. (дата обращения: 10.10.2022).
36. Cherif L., Merikhi B. A penalty method for nonlinear programming // *RAIRO - Operations Research*. 2019. vol. 53. no. 1. pp. 29–38.
37. Mnif M., Pham H. Stochastic optimization under constraints // *Stochastic Processes and their Applications*. 2001. vol. 93. pp. 149–180.
38. Horst R., Pardalos P.M., Thoai N.V. *Introduction to Global Optimization* // Kluwer Academic Publishers. 2000. 354 p.
39. Schuster H.G., Just W. *Deterministic Chaos* // John Wiley & Sons. 2006. pp. 312.
40. Pervaiz S., Ul-Qayyum Z., Bangyal W., Gao L., Ahmad J. A systematic literature review on particle swarm optimization techniques for medical diseases detection // *Comput Math Methods Med*. 2021. pp. 1–10.
41. Jiao J., Ghoreshi S., Moradi Z., Oslub K. Coupled particle swarm optimization method with genetic algorithm for the static-dynamic performance of the magneto-electro-elastic nanosystem // *Engineering with Computers*. 2022. no. 38. pp. 2499–2513.
42. Chen H., Fan D., Huang W., Huang J., Cao C., Yang L., He Y., Zeng L. Particle swarm optimization algorithm with mutation operator for particle filter noise reduction in mechanical fault diagnosis // *International Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence*. 2020. vol. 34. no. 10. pp. 1–8.
43. Патент РФ RU2021682129 Программа "Smart Oil Planning v1.0" 30/12/2021.
44. Lemarechal C. *Lagrangian Relaxation* // *Lecture Notes in Computer Science*. 2001. vol. 2241. pp. 112–156.

Кулаков Егор Дмитриевич — аспирант, институт космических и информационных технологий, ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет». Область научных интересов: анализ данных, машинное обучение, математическое моделирование, методы оптимизации. Число научных публикаций — 9. eg.2015j@yandex.ru; проспект Свободный, 79, 660041, Красноярск, Россия; р.т.: +7(391)244-8625.

Михалев Антон Сергеевич — старший преподаватель, институт космических и информационных технологий, ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет». Область научных интересов: искусственный интеллект, анализ данных, машинное обучение, компьютерное зрение, глубокое обучение, математическое моделирование, методы оптимизации. Число научных публикаций — 56. asmikhalev@sfu-kras.ru; проспект Свободный, 79, 660041, Красноярск, Россия; р.т.: +7(391)244-8625.

Саренков Александр Валерьевич — директор по разработке, ООО "Геомикс". Область научных интересов: цифровая трансформация нефтяной и горнорудной отрасли, разработка наукоёмкого программного обеспечения. Число научных публикаций — 8. a.sarenkov@jt-eg.ru; улица Академика Королева, 13/1, 129515, Москва, Россия; р.т.: +7(800)201-6596.

Шуталев Артем Дмитриевич — заведующий сектором проектирования разработки, ООО "РН-КрасноярскНИПИнефть". Область научных интересов: проектирование разработки, моделирование нефтяных и газовых месторождений, проектное управление. Число научных публикаций — 7. ShutalevAD@gmail.com; улица 9 Мая, 65д, 660098, Красноярск, Россия; р.т.: +7(391)200-8830.

Федорев Артем Евгеньевич — главный специалист - владелец продукта, ООО "РН-КрасноярскНИПИнефть". Область научных интересов: цифровизация процессов на основе технологий RPA/OCR, проектное управление, разработка концепций и формирование MVP проектов, реинжиниринг и оптимизация процессов. Число научных публикаций — 6. FedorevAE@knipi.rosneft.ru; улица 9 Мая, 65д, 660098, Красноярск, Россия; р.т.: +7(391)200-8830.

E. KULAKOV, A. MIKHALEV, A. SARENKOV, A. SHUTALEV, A. FEDOREEV
**POSITION CORRECTION ALGORITHM OF WELL PADS WHEN
SOLVING THE PROBLEM OF DEVELOPING OIL FIELDS**

Kulakov E., Mikhalev A., Sarenkov A., Shutalev A., Fedoreev A. **Position Correction Algorithm of Well Pads When Solving the Problem of Developing Oil Fields.**

Abstract. This article is devoted to the problem of automation of the stage of combining wells into clusters, considered as part of the process of designing the development of oil fields. The solution to the problem of combining wells into clusters is to determine the best location of well pads and the distribution of wells into clusters, in which the costs of developing and maintaining an oil field will be minimized, and the expected flow rate will be maximized. One of the currently used approaches to solving this problem is the use of optimization algorithms. At the same time, this task entails taking into account technological limitations when searching for the optimal option for the development of an oil field, justified, among other things, by the regulations in force in the industry, namely, the minimum and maximum allowable number of wells in a pad, as well as the minimum allowable distance between two well pads. The use of optimization algorithms does not always guarantee an optimal result, in which all specified constraints are met. Within the framework of this study, an algorithm is proposed that allows us to work out the resulting design solutions in order to eliminate the violated restrictions at the optimization stage. The algorithm consistently solves the following problems: violation of restrictions on the ultra-small and ultra-large number of wells in a pad; discrepancy between the number of pads with a given one; violation of the restriction of the ultra-close arrangement of pads. To study the effectiveness of the developed approach, a computational experiment was conducted on three generated synthetic oil fields with different geometries. As part of the experiment, the quality of the optimization method and the proposed algorithm, which is a raise to the optimization method, were compared. The comparison was carried out on different values of optimization power, which denotes the maximum number of runs of the target function. The evaluation of the quality of the work of the compared approaches is determined by the amount of the fine, which indicates the degree of violation of the values of the main restrictions. The efficiency criteria in this work are: the average value, the standard deviation, the median, and the minimum and maximum values of the penalty. Due to the use of this algorithm, the value of the penalty for the first and third oil fields is reduced on average to 0.04 and 0.03 respectively, and for the second oil field, the algorithm allowed to obtain design solutions without violating restrictions. Based on the results of the study, a conclusion was made regarding the effectiveness of the developed approach in solving the problem of oil field development.

Keywords: oil field, development of oil fields, oil well, cluster drilling, violation of design restrictions, adjustment of the position of cluster pads.

References

1. Kutuzova M. [Disaster with hope for the future]. *Neft' Rossii – Oil of Russia*. 2016. no. 11–12. pp. 28–31. (In Russ.).
2. Neft'yanka, shag vpered. *Spravit'sya li Rossiya? [Oil industry, step forward. Will Russia cope?]* Available at: <https://teknoblog.ru/2017/01/08/73260>. (accessed: 10.10.2022). (In Russ.).
3. Baskova M.L. [Analysis of the development of the oil industry in Russia] *NovalInfo.Ru*. 2015. no. 33. pp. 76–81. (In Russ.).

4. Fraj M.E. [Assessment of the current state of the oil industry in Russia] Vestnik Udmurtskogo universiteta. Seriya «Ekonomika i pravo» – Bulletin of the Udmurt University. Series "Economics and Law". 2015. no. 2. pp. 75–85. (In Russ.).
5. Eder L.V., Filimonova I.V., Provornaya I.V., Mamahatov T.M. [The state of the oil industry in Russia: production, processing, export]. Mineral'nye resursy Rossii. Ekonomika i upravlenie. – Mineral resources of Russia. Economics and Management. 2016. no. 6. pp. 41–51. (In Russ.).
6. Yergin D. The Prize: The Epic Quest for Oil, Money, and Power. Simon & Schuster. 1990. 887 p.
7. Prodromou T., Demirer R. Oil Price shock and cost of capital: Does market liquidity play a role? Energy Economics. 2022. pp. 1–39.
8. Al Jabri S., Raghavan M., Vespignami J. Oil prices and fiscal policy in an oil-exporter country: Empirical evidence from Oman. Energy Economics. 2022. vol. 111. pp. 1–33.
9. Chernaya polosa Gospodstvu nefiti v mire prihodit konec. V 2020-m ona poluchila udar, of kotorogo mozhet ne opravit'sya. [Black bar The dominance of oil in the world is coming to an end. In 2020, she received a blow from which she may never recover.] Available at: <https://lenta.ru/articles/2020/12/30/petroleum/>. (accessed: 10.10.2022). (In Russ.).
10. Vorob'ev A.E., Vorob'ev K.A., Tcharo H. Cifrovizaciya neftyanoj promyshlennosti [Digitalization of the oil industry]. Izdatel'stvo «Sputnik+». 2018. 327 p. (In Russ.).
11. Peskova D.R., Hodkovskaya Yu.V., Sharafutdinov R.B. [Digitalization of business processes in oil and gas companies]. Evrazijskij juridicheskij zhurnal – Eurasian Law Journal. 2018. no. 9. pp. 438–444. (In Russ.).
12. Tcharo H., Vorob'ev A.E., Vorob'ev K.A. [Digitalization of the oil industry: basic approaches and rationale for "intelligent" technologies]. Vestnik Evrazijskoj nauki – Bulletin of Eurasian Science. 2018. no. 2. pp. 1–17. (In Russ.).
13. Abasova H.A. [Characteristics of financial risks and their features in the oil industry]. Finansy i kredit – Finance and credit. 2013. no. 9. pp. 61–68. (In Russ.).
14. Vashchuk D.O., Kurochkin E.S., Belomestnov A.V. [Digitalization of the oil and gas industry]. Innovacionnyj potencial cifrovoj ekonomiki: Sb. nauchn. statej Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. [Innovative potential of the digital economy: Collected papers]. Kursk: YuZGU. 2021. pp. 79–82. (In Russ.).
15. Kozlova D. [Prospects and barriers for digital transformation of the Russian oil and gas complex]. Neftegazovaya vertikal': Specvypusk. Analiticheskoe obozrenie «Vektor» – Oil and gas vertical: Special issue. Analytical review "Vector". 2018. no. 15–16. pp. 19–26. (In Russ.).
16. Kozlova D.V., Pigarev D.Yu. [Intelligent mining why Russia needs to change the approach to state stimulation of the industry]. Neftegaz.Ru. 2018. no. 7. pp. 32–39. (In Russ.).
17. Tariq Z., Aljawad M.S., Hasan A., Murtaza M., Mohammed E., El-Husseine A., Alarifi S.A., Mahmoud M., Abdulraheem A. A systematic review of data science and machine learning applications to the oil and gas industry. Journal of Petroleum Exploration and Production Technology. 2021. no. 11. pp. 4339–4374.
18. Sircar A., Yadav K., Rayavarapu K., Bist N., Oza H. Application of machine learning and artificial intelligence in oil and gas industry. Petroleum Research. 2021. no. 6. pp. 379–391.
19. Hanga K.M., Kovalchuk Y. Machine learning and multi-agent systems in oil and gas industry applications: A survey. Computer Science Review. 2019. vol. 34. pp. 1–17.
20. Kust skvazhin [Well pad]. Available at: <https://proektirovanie.gazprom.ru/about/subsidiaries/47/>. (accessed: 10.10.2022). (In Russ.).

21. Silkina T.S., Sahimova E.E., Lyamina N.F., Saushin A.Z. [Analysis of a high-tech oil recovery method using sealing mesh when drilling a new well in a complex cluster system]. *Novejshie tekhnologii osvoeniya mestorozhdenij uglevodorodnogo syr'ya i obespechenie bezopasnosti ekosistem Kaspijskogo shelf'a: Materialy XII Mezhdunar. nauch.-prakt. konf.* [The latest technologies for the development of hydrocarbon deposits and ensuring the safety of the ecosystems of the Caspian shelf: Materials of the XII International scientific and practical conference] Astrahan': AGTU, 2021. pp. 62–65.
22. Liu G., Wang G., Zhao Z., Ma F. A new pattern of cluster-layout for deep geothermal reservoirs: Case study from Dezhou geothermal field, China. *Renewable Energy*. 2020. pp. 484–499.
23. Kheirollahi H., Chahardowli M., Simjoo M. A new method of well clustering and association rule mining. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2022. vol. 214.
24. Abramov A. Optimization of well pad design and drilling – well clustering. *Petroleum Exploration and Development*. 2019. no. 3. pp. 614–620.
25. Arbuzov V.N. *Ekspluatatsiya neftyanyh i gazovyh skvazhin Chast' 1* [Operation of oil and gas wells Part 1]. Izdatel'stvo TPU. 2011. 200 p. (In Russ.).
26. Loshakov D.S., Vasil'ev S.I., Miloserdov E.E., Ganiev D.F., Gerlinskij P.V. [Problems of arranging well pads in the presence of permafrost]. *Gornaya promyshlennost' – Mining industry*. 2016. no. 6. pp. 74–75. (In Russ.).
27. Denisov P.G. *Sooruzhenie burov [Construction of drilling]*. M: Nedra. 1989. 397 p. (In Russ.).
28. Bogatkina Yu.G., Eremin N.A., Lyndin V.N. [Features of drilling and formation of costs in the construction of oil and gas wells by the cluster method of Khanty-Mansi AA]. *Problemy ekonomiki i upravleniya neftegazovym kompleksom – Problems of economics and management of the oil and gas complex*. 2021. no. 10. pp. 5–9. (In Russ.).
29. Ermolaev A.I., Kuvichko A.M., Solov'ev V.V. [Models and algorithms for well pad placement and distribution of wells by pads in the development of oil and gas fields]. *Avtomatizatsija, telemehanizatsija i svjaz' v nefjtanoj promyshlennosti – Automation, telemechanization and communications in the oil industry*. 2011. no. 9. pp. 29–32. (In Russ.).
30. Mozhchil' A.F., Tret'jakov S.V., Dmitriev D.E., Gil'mutdinova N.Z., Esipov S.V., Karachev A.A. [Technical and economic optimization of well padding with integrated conceptual design]. *Neftjanoe hozjajstvo – Oil industry*. 2016. no. 4. pp. 126–129. (In Russ.).
31. Robertson E., Iyer N., Klenner R.C.L., Liu G. Optimization of unconventional well-pad area using reservoir simulation and intelligent sequential sampling. *Unconventional Resources Technology Conference*. 2017. pp. 1–12.
32. Kheirollahi H., Chahardowli M., Simjoo M. A new method of well clustering and association rule mining. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2022. vol. 214. DOI: 10.15530/urtec-2017-2673695.
33. Shatrovskij A.G., Chinarov A.S., Salihov M.R. [Grouping of project wells for placement of well pads on the example of a multi-layer field]. *PRONEFT'. Professional'no o nefti – PRONEFT. Professionally about oil*. 2020. no. 3. pp. 44–49. (In Russ.).
34. Kulakov E.D., Mikhalev A.S., Kuznetsov A.S., Sarenkov A.V., Shutalev. A.D., Gorokhov A.P., Fedoreev A.E. Planning development automation of oil fields. *AIP Conference Proceedings 2402*. 2021. pp. 1–13.

35. Obustrojstvo neftyanyh i gazovyh mestorozhdenij. Trebovaniya pozharnoj bezopasnosti [Arrangement of oil and gas fields. Fire safety requirements]. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/1200122146>. (accessed: 10.10.2022). (In Russ.).
36. Cherif L.B., Merikhi B. A penalty method for nonlinear programming. *RAIRO - Operations Research*. 2019. vol. 53. no. 1. pp. 29–38.
37. Mnif M., Pham H. Stochastic optimization under constraints. *Stochastic Processes and their Applications*. 2001. vol. 93. pp. 149–180.
38. Horst R., Pardalos P.M., Thoai N.V. *Introduction to Global Optimization*. Kluwer Academic Publishers. 2000. 354 p.
39. Schuster H.G., Just W. *Deterministic Chaos*. John Wiley & Sons. 2006. pp. 312.
40. Pervaiz S., Ul-Qayyum Z., Bangyal W.H., Gao L., Ahmad J. A systematic literature review on particle swarm optimization techniques for medical diseases detection. *Comput Math Methods Med*. 2021. pp. 1–10.
41. Jiao J., Ghoreshi S., Moradi Z., Oslub K. Coupled particle swarm optimization method with genetic algorithm for the static-dynamic performance of the magneto-electro-elastic nanosystem. *Engineering with Computers*. 2022. no. 38. pp. 2499–2513.
42. Chen H., Fan D.L., Huang W., Huang J., Cao C., Yang L., He Y., Zeng L. Particle swarm optimization algorithm with mutation operator for particle filter noise reduction in mechanical fault diagnosis. *International Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence*. 2020. vol. 34. no. 10. pp. 1–8.
43. RU2021682129 [Program "Smart Oil Planning v1.0"] 30/12/2021. (In Russ.).
44. Lemarechal C. *Lagrangian Relaxation. Lecture Notes in Computer Science*. 2001. vol. 2241. pp. 112–156.

Kulakov Egor — Postgraduate student, Institute of space and information technologies, Siberian Federal University. Research interests: data analysis, machine learning, mathematical modeling, optimization methods. The number of publications — 9. eg.2015j@yandex.ru; 79, Svobodny Av., 660041, Krasnoyarsk, Russia; office phone: +7(391)244-8625.

Mikhalev Anton — Senior lecturer, Institute of space and information technologies, Siberian Federal University. Research interests: artificial intelligence, data analysis, machine learning, computer vision, deep learning, mathematical modeling, optimization methods. The number of publications — 56. asmikhalev@sfu-kras.ru; 79, Svobodny Av., 660041, Krasnoyarsk, Russia; office phone: +7(391)244-8625.

Sarenkov Aleksandr — Director of development, LLC "Geomix". Research interests: digital transformation of the oil and mining industry, development of high-tech soft-ware. The number of publications — 8. a.sarenkov@rt-eg.ru; 13/1, Akademika Koroleva St., 129515, Moscow, Russia; office phone: +7(800)201-6596.

Shutalev Artem — Head of the field development sector, LLC RN-KrasnoyarskNIPIneft. Research interests: reservoir engineering and simulation, project management. The number of publications — 7. ShutalevAD@gmail.com; 65д, 9 May St., 660098, Krasnoyarsk, Russia; office phone: +7(391)200-8830.

Fedoreev Artem — Main specialist, product owner, LLC RN-KrasnoyarskNIPIneft. Research interests: digitalization of processes based on technologies RPA/OCR, project management, concept development and MPV project formation, reengineering and process optimization. The number of publications — 6. FedoreevAE@knipi.rosneft.ru; 65д, 9 May St., 660098, Krasnoyarsk, Russia; office phone: +7(391)200-8830.