

# Фізико-технічні проблеми видобування енергоносіїв

УДК 66.092-977 +662.67

## СЛАНЦЕВЫЙ ГАЗ БЕЗ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ РИСКОВ

*Л.Я. Шварцман, Э.А. Троценко, Е.В. Баженов, П.Е. Баженов*

ООО Инфоком; 69001, г. Запорожье, бул. Т. Шевченко, 56,  
e-mail: dr@i.a.u.a

*Викладено переваги внутріпластового (підземного) ретортингу горючих сланців способом термозонного резистивно-дугового нагрівання сировинного пласта в порівнянні з застосовуваними на сьогодні промисловими технологіями. Ефективність внутріпластового способу зумовлюється виключенням з технології великої кількості підготовчих і утилізаційних операцій, пов'язаних з вилученням сировини на поверхню, що формує високий техніко-економічний потенціал розвитку в цьому напрямку способів підземної і внутріпластової газифікації горючих сланців. Запропоновані рішення базуються на сучасному досвіді горизонтального буріння свердловин у газонафтовидобуванні і електротехнічних методах термохімії, що дає змогу розробляти глибокозалегаючі пласти горючого сланцю, забезпечуючи при цьому енергетичну та економічну ефективність розробки малопотужних пластів. Застосування внутріпластової газифікації дає змогу значно зменшити стартові капітальні витрати на створення наземної інфраструктури промислових споруд і комунікацій, усуваючи один з найсуттєвіших чинників стримання розвитку, характерний для гірничодобувних підприємств. Патентні рішення авторів доповнені прикладом розроблення математичної моделі, що забезпечує можливість параметризації технологічного процесу і оцінювання енергетичної та економічної ефективностей розробки пласта із заданими геологічними даними і фізико-хімічними характеристиками горючого сланцю. Для розглянутого процесу за базу для побудови математичної моделі вибрано температурне поле, сформоване в робочій області ведення процесу і переміщуване з розрахунковою швидкістю всередині пласта копалини.*

Ключі слова: горючі сланці, сланцевий газ, сланцева нафта, внутрішньопластовий ретортинг, модель, оцінки техніко-економічних показників (ТЕП).

*Изложены преимущества внутрипластового (подземного) ретортинга горючих сланцев способом термозонированного резистивно-дугового нагрева сырьевого пласта по сравнению с применяемыми сегодня промышленными технологиями. Эффективность внутрипластовых способов объективно определяется исключением из технологии большого количества подготовительных и утилизационных операций, связанных с извлечением сырья на поверхность, формируя высокий технико-экономический потенциал развития в этом направлении способов подземной и внутрипластовой газификации горючих сланцев. Предлагаемые решения основаны на современном опыте горизонтального бурения скважин в газонефтедобыче и электротехнических методов термохимии, позволяя вести разработку глубоко залегающего горючего сланца, в том числе обеспечивая энергетическую и экономическую эффективность разработки маломощных пластов. Решения внутрипластовой газификации позволяют значительно уменьшить стартовые капитальные затраты на создание наземной инфраструктуры промышленных сооружений и коммуникаций, устраняя один из важнейших факторов сдерживания развития, характерный для горнодобывающих предприятий. Патентные решения авторов дополнены разработкой математической модели, обеспечивающей возможность параметризации технологического процесса и оценивания энергетической и экономической эффективности разработки пласта с заданными геологическими данными и физико-химическими характеристиками горючего сланца. Для рассматриваемого процесса в качестве базы для построения математической модели выбрано температурное поле, формируемое в рабочей области ведения процесса и перемещаемое с расчетной скоростью внутри пласта ископаемого.*

Ключевые слова: горючие сланцы, сланцевый газ, сланцевая нефть, внутрипластовой ретортинг, модель, оценки технико-экономических показателей (ТЭП).

The article deals with the advantages of in-situ (underground) oil shale retorting by means of the formation thermozone resistive arc heating in comparison with the industrial techniques used today. The efficiency of the in-situ method is conditioned by exclusion from the technique of a great number of preparation and utilization operations, associated with the raw material extraction, which forms a high technical and economic potential for development of the underground and in-situ oil shale gasification methods. The suggested solutions are based on the experience of modern horizontal well drilling in oil and gas production, as well as on the electrical methods of thermochemistry, that provides a possibility to develop deep-lying oil shale and at the same time provide energy and economic efficiency of thin formation development. Application of in-situ gasification can significantly reduce initial capital investments for construction of ground infrastructure of industrial facilities and communications, eliminating one of the most important factors of development retention, which is typical for mining companies. The authors' patent solutions are complemented by an example of the mathematical model development that provides a possibility to parameterize the technological process and evaluate energy and economic efficiency of development of a formation with the specified geological data and oil shale physical-chemical characteristics. The temperature field, which is generated in the process working area and which is moved with the calculated speed inside the well formation, was selected for the process as a basis for the mathematical model development.

Keywords: oil shale, shale gas, shale oil, in-situ retorting, model, engineering and economic evaluations (EEE).

**Цель работы** – сравнительный анализ промышленно применяемых технологий получения сланцевого газа. оценка их недостатков и изложение одного из возможных направлений минимизации проблем расширения использования горючих сланцев.

**Существующее положение** характеризуется устойчивой тенденцией роста стоимости традиционных энергоресурсов, определяя повышенный интерес к вопросам расширения сырьевой базы энергетического обеспечения потребностей современного общества. Одно из таких направлений – использование низкокалорийных твердых энергоносителей, в частности горючего сланца [1, 2, 3].

Применяемая в широких масштабах технология газонефтедобычи способом Фрекинга-процесса реализуется методом «гидроразрыва пласта», предполагающего применение химических реагентов на больших территориях и интенсивное нарушение целостности недр, приводящим к экологически неблагоприятным последствиям. Кроме всего прочего, это очень дорогой способ добычи. Из опыта США: стоимость обустройства одной скважины составляет \$2,6 – \$4 млн., помимо этого в соответствии с технологическим регламентом на каждой такой скважине ежегодно проводится по 3-4 технологических операции «гидроразрыва» стоимостью \$250,0 тыс. каждая.

Традиционный способ наземной переработки горючих сланцев по технологии внепластового (наземного) ретортинга [2]: *GaloterProcess* (ГАЛОТЕР, Россия – Эстония), *Enefit* (модификация процесса *Galoter*), *Kiviter* (Эстония), *Alberta-TaciukProcess* (АТР) (Австралия), *Petrosix* (Бразилия), *ToscoII* (США), *Фушунь* (Китай), *ParahoProcess* (США), *Lurgi-Ruhrgas* (Германия), *ChevronSTB* (США) и др. – быстро развивается, позволяя достичь показателей экономической эффективности переработки горючих сланцев, сопоставимых с показателями сжигания качественного угля [3]. Но способ имеет ограничения, вызванные экологическими проблемами утилизации больших объемов пустой породы и экономическими ограничениями с ростом глубины залегания рабочих пластов и ростом издержек на доставку сырья к месту переработки.

Сегодня все больше аргументов в доказательство высокой эффективности и экологичности приводится в пользу **внутрипластового ретортинга** (*Shell ICP*, *Chevron ICP*, *Exxon Mobil Electrofrac*, *AMSOEGL Technology*) [2]. Несмотря на недостатки:

- значительный интервал (от двух до четырех лет [2]) от начала процесса нагрева пласта до получения «первой нефти»;

- высокая стартовая капиталоемкость технологии;

- более низкая степени извлечения компонентов-энергоносителей из горючего сланца по сравнению с технологиями наземного ретортинга;

- эффективность внутрипластовых способов обеспечивается исключением из технологии многих подготовительных и утилизационных операций, формируя высокий потенциал своего развития.

**Низкотемпературный пиролиз горючих сланцев** реализуется термической обработкой сырья при температурах 460<sup>0</sup>С - 490<sup>0</sup>С, без доступа кислорода.

Горючие сланцы (далее ГС) – твердая осадочная горная порода, образованная в результате накопления в условиях кислородной изоляции органического вещества – керогена, составляющего от 5% до 40% . редко – до 60% в ГС. Органическое вещество вкраплено в минеральную массу в виде коллоидных частиц шарообразной формы диаметром 0,02–0,14 мм. Теплота сгорания керогена 29–37 МДж/кг. ГС являются отличным, но достаточно трудным технологическим сырьём – основная сложность использования ГС и состоит в низкой концентрации керогена в породе.

Технология пиролиза обеспечивает достаточно полное разделение керогена на твердый компонент – коксозольный остаток (далее – КЗО), и летучие вещества – сланцевый газ и сланцевую смолу (сланцевое масло), эвакуируемые из области реакции в виде смеси газифицированных углеводородов, так называемой парогазовой смеси (далее ПГС). Уже вне процесса пиролиза ПГС разделяется на компоненты путем управляемой конденсации. Полученные углеводородные компоненты используются в энергетике, нефтехимии, биохимии, произ-

водстве строительных материалов, фармакологии и пр.

Пиролитическое разложение керогена ГС является сложным физико-химическим процессом, сопровождающимся испарением влаги, выделением газов ( $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{N}$ ) и образованием термобитума. При внутрипластовом ретортинге обработка ископаемого ведется непосредственно в открытом горном массиве – вследствие чего отсутствует возможность термической лимитации рабочей области. Это приводит к тому, что процессы идут параллельно во всем множестве, характерном для последовательного нагрева горючего сланца от температуры его природного залегания в горном массиве, до заданного значения. Например, при медленном нагреве параллельно с выделением газообразных фракций, абсорбированных в массиве сланца, избирательно разрушаются наименее прочные молекулярные связи и идет процесс термобитумизации сланца – одним из следствий которого является снижение выхода смолы и усиление процессов коксования [4]. При увеличении скорости нагрева ускоряется деструкция сложных органических молекул ГС, но темп роста деструктивных превращений отстает от темпа роста температуры и соответственно сдвигается в область более высоких температур, что также приводит к снижению выхода смолы и увеличению выхода газообразных продуктов. Парогазовое дутье или понижение давления также снижают степень коксования при медленном нагреве. Использование водяного пара позволяет увеличить выход смолы по сравнению с обычным пиролизом, более того при использовании водяного пара меняется состав получаемой смолы. Вода также является ингибитором коксования гетероатомных соединений.

Таким образом, *определяющими факторами являются температура, время нахождения ГС в рабочей области и давление ПГС в зоне реакции.*

Расчет тепловых балансов и температурных полей, влажности и давления, газопроницаемости слоев и кинетики химических реакций – в зависимости от вышеперечисленных физических параметров, очевидно, является достаточно сложной и трудоемкой процедурой. Кроме того, *затраты времени на получение оптимального решения могут оказаться несопоставимы с временным интервалом сохранения адекватности управляющего решения.* Выход видится в стандартном для технологического управления разумном ограничении подробности описания модели исходя из взаимосвязи и динамики значимых, определяющих основные параметры процесса переменных.

Для рассматриваемого процесса таковой характеристикой является *температурное поле, сформированное в рабочей области ведения процесса, и его характеристика – скорость перемещения внутри пласта ископаемого.* Такая формулировка постановки задачи обеспечит:

- согласование мощности нагрева с мощностью промышленного пласта ГС, устраняя избыточные потери на нагрев окружающего пласт горного массива;

- перемещение рабочей области внутри пласта со скоростью, обеспечивающей максимальную производительность по ПГС с ограничениями по полноте переработки ГС в отработанном объеме и составе ПГС, определяемой скоростью нагрева ископаемого.

**Решение проблемы** устранения названных недостатков внутрипластового ретортинга ГС состоит в применении предлагаемого к реализации **способа резистивно-дугового нагрева пласта сланца термозонированными участками** (далее способ **TZ-RA**) [5]. Суть предложенного способа управляемого нагрева пласта ГС состоит в использовании особенности сланца изменять электропроводные свойства в зависимости от температуры: удельное электрическое сопротивление ГС изменяется в широких пределах – от  $10^{12}$  Ом\*м до  $10^{13}$  Ом\*м при температуре естественного залегания ( $20\text{ }^\circ\text{C}$  –  $50\text{ }^\circ\text{C}$ ), до  $100$  Ом\*м при  $T > 600\text{ }^\circ\text{C}$  и  $0,025$  Ом\*м при  $T > 900\text{ }^\circ\text{C}$  [4, стр. 47, 48, 64]. Использование этих особенностей ГС позволяет в результате предварительного разогрева создать электропроводный канал непосредственно в теле пласта, используя в качестве проводника электрического тока сам сланец. В дальнейшем, регулируя токовую нагрузку, управлять температурой токопроводящего слоя, поддерживая температуру на обеспечивающем электропроводность уровне, и тем самым имея возможность управлять теплогенерацией внутри пласта ГС.

Особенностью рассматриваемого способа является возможность создания внутри пласта ограниченной термозонированной области, параметры которой расчетным путем оптимизируются исходя из мощности (толщине) и глубине залегания пласта ГС, теплофизических свойств ГС и окружающего горного массива, концентрации и составу керогена. Возможность управления скоростью перемещения рабочей области реакций в предложенном способе [5] позволяет регулировать градиент температур внутри рабочей области, а значит и скоростью протекания реакций пиролиза – соответственно. Кроме регулирования производительностью имеется возможность управлять не только объемом (количеством), но и составом получаемых продуктов реакции. Теоретическое обоснование [4] этих возможностей общее как для внепластового (наземного), так и внутрипластового ретортинга.

Способ обеспечит упрощение аппаратной адаптации технологии по глубине залегания и мощности пласта ГС, в силу чего может претендовать на значительную степень технической и технологической универсальности.

Реализация способа TZ-RA позволяет избежать значительных капитальных затрат на обеспечение добычи и подготовки сырья, строительство производственных помещений и комплектацию производства громоздким тех-

нологическим оборудованием, решения проблем утилизации большого количества пустой породы, характерным для внепластового ретортинга. Реализация способа позволяет избежать значительных капитальных и операционных затрат, создания сложной и дорогостоящей системы внутривластовой теплогенерации, обеспечивающей многолетний нагрев массива ГС – характерным для внутривластового ретортинга по технологиям ICP. Временной интервал от начала процесса нагрева пласта до получения товарного продукта составляет несколько суток.

**Концептуальное изложение моделирования теплофизического процесса нагрева пласта перемещаемым точечным генератором тепла.**

Построение математической модели выполнено исходя из приведенного ниже обоснования ее структуры. Модель должна обеспечивать описание зависимости объемов тепловой интервенции в пласт ГС:

- от глубины залегания пласта;
- от мощности (толщины) пласта;
- от предписанных температурных параметров рабочей области, определенных на основании технологического расчета;

а также позволять выполнить обоснование скорости перемещения рабочей области внутри пласта в зависимости от скорости распространения реакции пиролиза в массиве горючего сланца.

Конечное назначение модели – вариативная оценка технико-экономических показателей внутривластовой конверсии горючих сланцев в парогазовую смесь исходя из возможных значений тепловой мощности и скорости перемещения точечного теплогенератора, выполняемая для конкретных физико-химических характеристик горючего сланца.

Рассмотрим модель, описывающую температурное поле внутри пласта горючего сланца, генерируемое точечным источником тепла, который перемещается вдоль оси пласта с заданной линейной скоростью. **Мощность источника тепла и скорость его перемещения рассчитываются таким образом, что изотерма, условно ограничивающая рабочую область минимальным значением температур, определяющих начало процессов пиролиза ГС, находилась бы на границе разделения пласта ГС и пустой породы в горном массиве.** Логика базовой посылки состоит в том, что теплопроводность горючего сланца на порядок ниже теплопроводности пород, составляющих окружающий горный массив, предопределяет естественные ограничения тепловых потерь в горный массив за счет оптимизации параметров теплового поля путем приведенного ограничения.

Независимо от природы источника тепла теплогенерирующий канал целесообразно расположить внутри пласта на равном расстоянии от его граничных поверхностей. Данные допущения для процедуры оптимизации теплогене-

рации обеспечивают схему симметричной и равномерной аккумуляции тепла внутри пласта ГС. Несимметричное расположение канала вне пласта ГС привело бы к неэффективности нагрева ГС. Неэффективность определялась бы низкой теплоемкостью (более чем в 2 раза относительно ГС [4, стр. 47, 48, 79]) и высокой теплопроводностью минеральной породы (выше более чем в 7 раз [4, стр. 80,11]), окружающей пласт.

Как уже отмечалось, **отсутствие возможности термической лимитации рабочей области в условиях обработки ископаемого в открытом горном массиве** приводит к тому, что о формировании рабочей области можно говорить как об условном объеме в пласте ископаемого, лежащего в границах температурных ограничений реакций низкотемпературного пиролиза. Температура процесса зависит от характеристик ископаемого, глубины залегания пласта и прочих условий. Исходя из аналогии с ретортными схемами переработки ГС (например, процесс «ЭНЕФИТ» [6]) температура процесса определена диапазоном 460–490<sup>0</sup>С [34]. Верхняя граница температур может быть увеличена до 550–600<sup>0</sup>С [4] с целью корректировки скорости процесса пиролиза, определяя потенциал регулирования составом получаемой ПГС и производительности процесса.

Температурное поле рабочей области строится исходя из допущения гомогенности его теплофизических характеристик – пренебрегая при первоначальном анализе процесса анизотропностью теплопроводящих свойств ГС как слоистого материала.

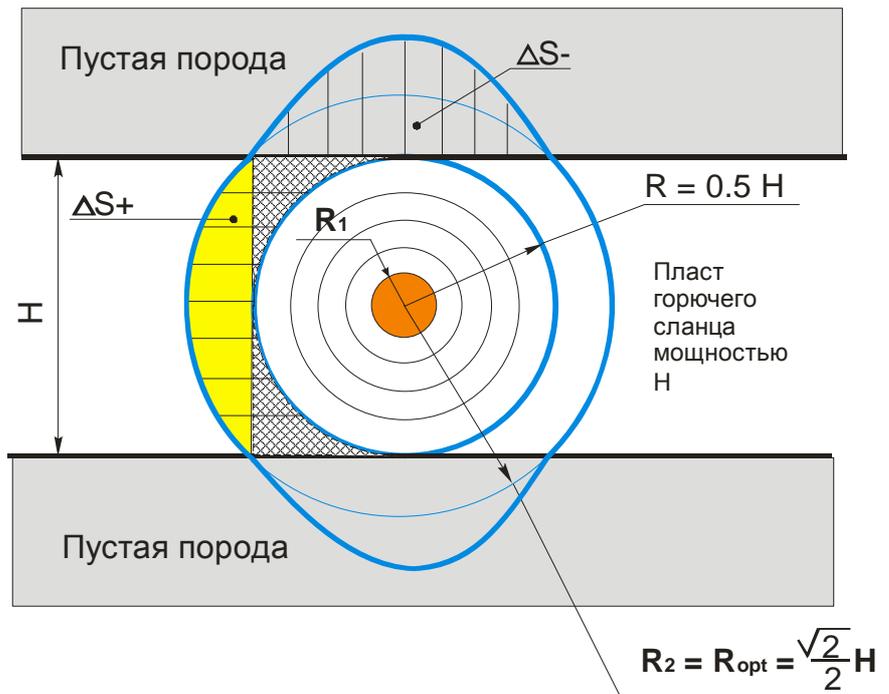
Глубина залегания пласта ГС, как фактор параметризации модели, используется для корректировки мощности источника тепловой энергии, исходя из принципа суперпозиции (наложения) создаваемого и естественного температурного полей Земли.

Значительное отличие показателей теплопроводности пустой породы и ГС определяют целесообразность учета мощности пласта при определении размеров рабочей области – локальной области разогрева в пласте ГС. Тепловые потери рассеяния неизбежны, но могут быть ограничены обоснованным определением границы рабочей области исходя из разрешения противоречия:

- увеличение размеров рабочей области приведет к увеличению объема ГС в реакции, соответственно к увеличению производительности по целевым продуктам;

- увеличение размеров рабочей области приведет к непропорциональному увеличению тепловых потерь на нагрев пустой породы.

Схема формируемой рабочей области (рис. 1) наглядно демонстрирует изменение интенсивности тепловых потерь в окружающую среду при выходе теплового поля из пласта ГС в пустые породы горного массива. Минимизация потерь на рассеяние тепла в окружающий массив достигается при  $R_2 = 0,5 H$ .



$R$  – радиус изотерм;  $R_1$  – радиус теплогенерирующей поверхности  
**Рисунок 1 – Графическая интерпретация оптимизации размера рабочей области в пласте ГС**

Но это минимизирует и объем нагреваемой рабочей области.

Далее для описания модели температурного поля внутри пласта ГС введены обозначающие исходные физико-химические характеристики горючего сланца, мощность и глубина залегания пласта – переменные:

- геофизические:
- $h_0$  – глубина "нейтрального слоя" (описано выше), (м);
- $T_0$  – температура "нейтрального слоя", ( $^{\circ}\text{C}$ );
- $\sigma$  – геотермический коэффициент, ( $^{\circ}\text{C}/\text{м}$ );
- $h$  – глубина залегания рабочего слоя ГС, (м);
- $H$  – мощность пласта (или рабочего слоя в пласте) ГС, (м);
- теплофизические и физико-химические:
- $\lambda$  – теплопроводность ГС, ( $\text{ккал}/\text{м}\cdot\text{час}\cdot^{\circ}\text{C}$ );
- $c$  – эффективная теплоемкость ГС, ( $\text{ккал}/\text{кг}\cdot^{\circ}\text{C}$ );
- $\rho$  – плотность ГС, ( $\text{кг}/\text{м}^3$ );
- $v_{\text{пр}}$  – скорость распространения реакции пиролиза, ( $\text{мм}/\text{час}$ );
- $T_{\text{min}}$  – температура внешней границы рабочей области (минимальное значение), ( $^{\circ}\text{C}$ );
- $T_1$  – температура токопроводящего канала, ( $^{\circ}\text{C}$ );
- $T_{\text{max}}$  – температура внутренней границы рабочей области (максимальное значение), ( $^{\circ}\text{C}$ );
- а также вычисляемые параметры:
- $T(h)$  – температура пласта ГС в горном массиве при естественных условиях залегания, ( $^{\circ}\text{C}$ );

$R_{\text{opt}}$  – радиус максимального распространения поля рабочей области (расстояние от оси перемещения генератора тепла до изотермы  $T_{\text{min}}$ ), (м);

$\chi$  – температуропроводность пласта ГС, ( $\text{кв.м}/\text{час}$ );

$v_{\text{ор}}$  – скорость перемещения области реакций вдоль оси рабочей скважины, ( $\text{мм}/\text{час}$ );

$Q$  – тепловая мощность движущегося генератора тепла, ( $\text{кВт}$ );

$R_1$  – радиус изотермы  $T_1$ , определяющей габарит токопроводящего канала (расстояние от оси перемещения генератора тепла до изотермы  $T_1$ ), (м).

Переходя к описанию теплового поля, генерируемого перемещаемым источником тепла в однородной среде со скоростью  $v_{\text{po}}$ , воспользуемся зависимостью, описывающей установившееся после достаточно большого промежутка времени стационарное тепловое поле в подвижной системе координат, перемещаемой с генератором тепла [7]:

$$T(x^*; y^*; z^*) = \frac{Q}{4\pi\lambda R} \exp\left(\frac{-v_{\text{ор}}(R + x^*)}{2\chi}\right); \quad (1)$$

где

$$R = \sqrt{(x^*)^2 + (y^*)^2 + (z^*)^2}; \quad (2)$$

В этой подвижной системе  $(x^*; y^*; z^*)$  начало координат совмещено с генератором тепла и соответственно перемещается вдоль оси  $X$  неподвижной системы  $(x; y; z)$  со скоростью перемещения  $v_{\text{ор}}$ . Таким образом, изотермами (1) описывается стационарное неподвижное в системе  $(x^*; y^*; z^*)$  поле. Графическая интерпретация теплового поля – семейство изотерм для

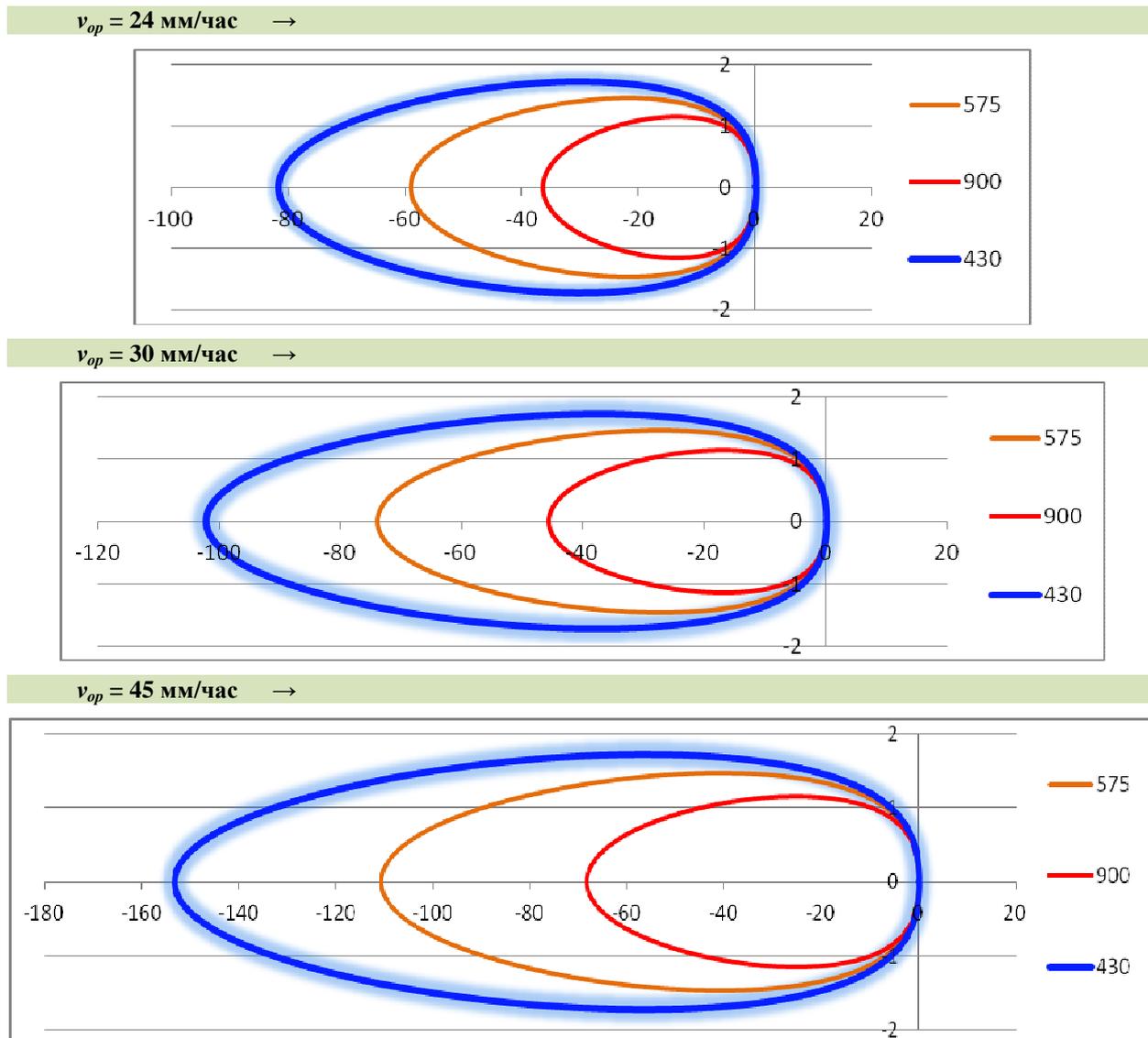


Рисунок 2 – Семейство изотерм ( $T = 430^{\circ}\text{C}/575^{\circ}\text{C}/900^{\circ}\text{C}/1200^{\circ}\text{C}$ ), описывающих температурное поле перемещаемого с различной скоростью источника тепла

$v_{op} \neq 0$  для некоторого множества входных параметров показано на рис. 2.

Расширение представления о формируемом температурном поле обеспечивают графики температурного фронта, графики температур и градиента температур вдоль оси перемещения точечного источника тепла (рис. 3–5).

Как видно из рис. 2, целесообразным является выбор таких параметров температурного поля, при которых:

- температурным полем охватывался бы весь пласт ГС (в соответствии с рисунком – вертикальный габарит изотермы  $T_{min} = 430^{\circ}\text{C}$  должен быть равен толщине пласта ГС);

- скорость перемещения области реакций  $v_{op}$  должна быть согласованной со скоростью распространения реакций пиролиза  $v_{pn}$  таким образом, что бы реакции были завершены во всех точках объема до момента их выхода из температурной области пиролитического разложения ГС (скорость перемещения рабочей области  $v_{op}$  функционально **предопределена**

значениями скорости распространения реакций пиролиза  $v_{pn}$ ).

“Привязка” параметров теплового поля к габаритам пласта ГС реализуется вычислением мощности теплового источника  $Q(\text{кВт})$ , обеспечивающей реализацию условия:

$$y^*_{max, Tmin} = R_{opt} \tag{3}$$

где  $y^*_{max, Tmin}$  – точка *extr* изотермы  $T_{min}$  (на рис. 1:  $T_{min} = 430^{\circ}\text{C}$ );

$R_{opt}$  – определено исходя из мощности пласта  $H$  и принятого критерия оптимизации габаритов теплового поля.

Анализ тепловых полей с использованием аналитической процедуры поиска экстремальных точек – точек *extr*:  $x^*_{opt}$  и  $y^*_{max}$  выделяется в силу важности использования полученных *extr* – значений для вычисления параметров генератора тепла (мощностных, пространственных, временных). В силу симметричности теплового поля относительно оси  $X^*$  поиск  $z^*_{max}$  более чем прост,  $z^*_{max} = y^*_{max}$ .

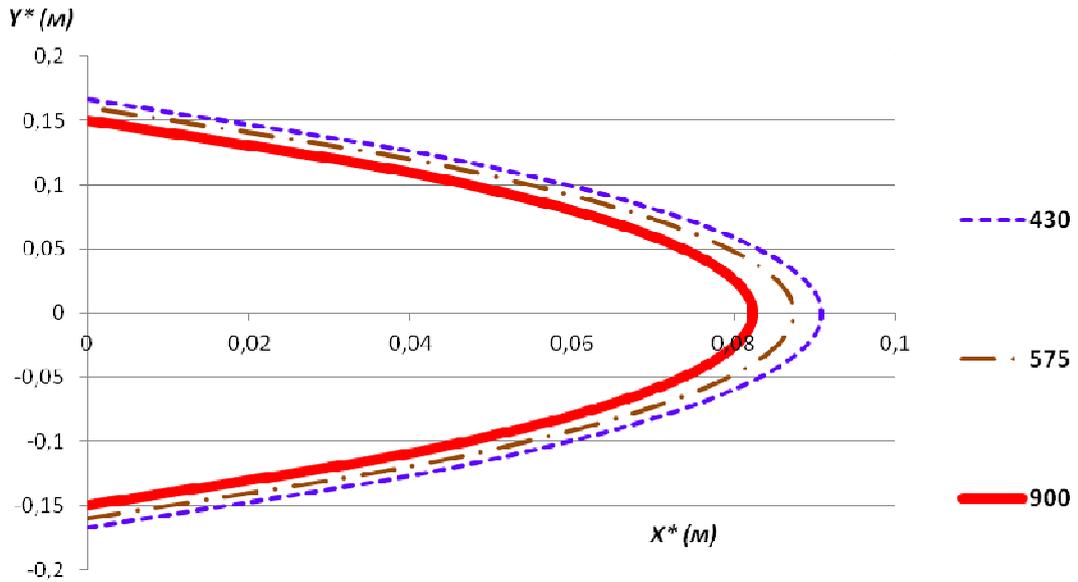


Рисунок 3 – Фронт распространения теплового поля от перемещаемого точечного теплогенератора бесконечно малого размера

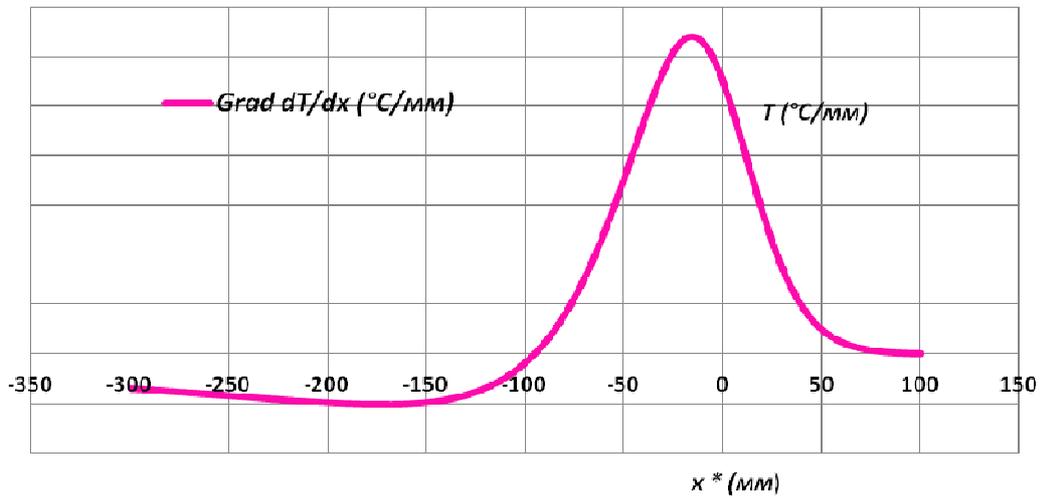


Рисунок 4 – Характер распределения градиента температуры вдоль оси перемещения теплового поля от точечного теплогенератора бесконечно малого размера

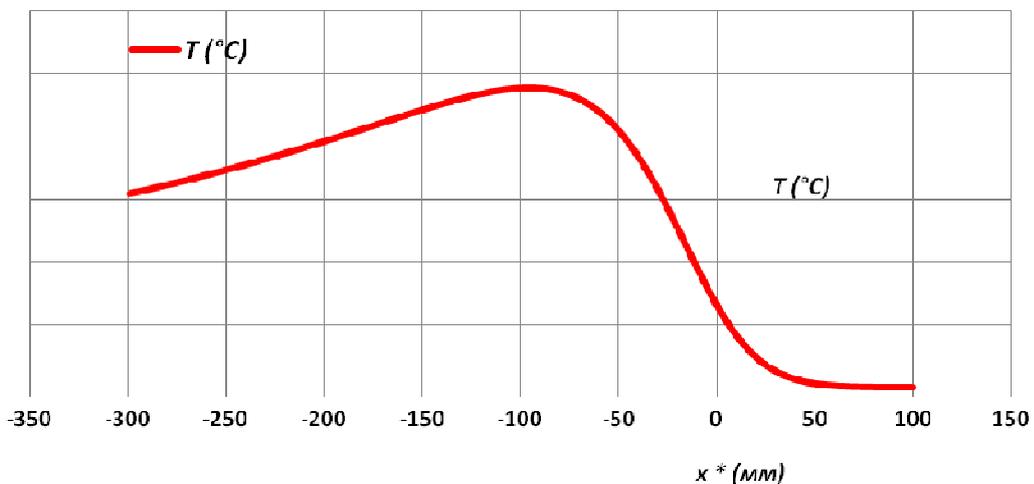


Рисунок 5 – Характер распределения температуры вдоль оси перемещения теплового поля от точечного теплогенератора бесконечно малого размера



**Рисунок 6 – Зависимость тепловой мощности нагрева от скорости перемещения точечного генератора тепла внутри пласта ГС**

Таким образом, процедура вычислений **позволяет** при заданных теплофизических характеристиках ГС по заданной глубине расположения ( $h$ ) и мощности (толщине  $H$ ) пласта **определить тепловую мощность  $Q$**  генератора тепла, перемещаемого по оси пласта с заданной скоростью  $v_{op}$ , и создающего такое тепловое поле, что его изотермическая поверхность  $T = T_{min}$  имеет габаритный размер, полностью перекрывающий пласт  $H$  ( $y^*_{max}, T_{min} = R_{opt}$  или  $y^*_{max}, T_{min} = 0,5 * H$  – в зависимости от выбранного решения по критерию оптимизации размеров рабочего поля).

Тепловое обеспечение компенсации тепловых потерь в окружающую среду, величина которого  $Q$  рассматривается как **база для расчета суммарного теплового баланса** всего множества химических реакций и физических процессов пиролитического разложения керогена внутри пласта ГС. Так как суммарный тепловой эффект пиролитического разложения ГС отрицателен (процесс идет с явно выраженным преобладанием эндотермических эффектов), при определении энергетических затрат обеспечения процесса введена поправка на компенсацию этих затрат  $Q^+$ .

Таким образом, суммарные тепловые затраты обеспечения процесса будут определяться выражением

$$Q_{\Sigma} = Q + Q^+. \quad (4)$$

Зависимость теплового обеспечения заданного температурного режима для области реакции внутри пласта от скорости перемещения генератора тепла представлена на рис. 6.

В модели принято, доказанное оптимальным, решение  $v_{op} = v_{pn}$ . Невыполнение условия  $v_{op} = v_{pn}$  приведет к уменьшению производительности процесса. Причины “потерь” производительности зависят от условия, их вызывающего.

Если  $v_{op} > v_{pn}$  будет происходить “отставание” перемещения фронта распространения реакций от перемещения фронта температурного поля. Как следствие – незавершенность реакций пиролиза, соответственно потери производительности по целевому продукту, неэффективная отработка пласта из-за появления непрореагировавших остатков керогена.

Если  $v_{op} < v_{pn}$ , будет происходить “торможение” перемещения фронта распространения реакций более медленным перемещением фронта температурного поля. Как следствие – потери производительности по целевому продукту вследствие временного “перегрева” рабочей области.

Результаты расчета производительности по ГС (условно, объем подвергнутого пиролитической переработке ГС внутри пласта) от ско-

Зависимость Производительности по ГС от скорости перемещения генератора тепла

(для пласта мощностью  $H = 3,45$  м и при глубине залегания  $h = 1500$  м)



Рисунок 7 – График зависимости производительности от скорости перемещения точечного генератора тепла внутри пласта ГС

рости перемещения точечного генератора тепла внутри пласта ГС представлены на рис. 7.

Показатель энергетической эффективности (исключительно по тепловому эквиваленту) процесса  $EROEI$  (*energy returned on energy invested*):

$$EROEI = \frac{G_{ГС} \cdot q_{ГС}}{Q}, \quad (5)$$

где  $Q$  – тепловая мощность генератора тепла;  $G_{ГС}$  – производительность процесса по подвергнутому пиролизической переработке ГС внутри пласта;

$q_{ГС}$  – теплота сгорания ГС.

Результаты расчета  $EROEI$  – зависимость критерия от скорости перемещения точечного генератора тепла внутри пласта ГС графически отражены на рис. 8.

### Выводы

Внутрипластовой пиролиз горючего сланца способом резистивно-дугового нагрева термозонированными участками (способ **TZ-RA**), в сравнении с промышленно освоенными технологиями получения углеводородов из горючего сланца сопоставим по уровню энергетической эффективности.

Перспективность способа **TZ-RA** обеспечивается его “экологической лояльностью” исключением из процесса целого ряда подготовительных и утилизационных операций.

Предложенный внутрипластовой пиролиз горючего сланца способом резистивно-дугового нагрева пласта сланца термозонированными участками (способ **TZ-RA**) может быть формально описан с помощью средств математической физики.

Разработан пакет программ, позволяющий эффективно определять основные технологические параметры процесса, выполнять оценку технико-экономических показателей оцениваемых вариантов различных схем реализации резистивно-дугового способа нагрева пласта (например, с сохранением токопроводящего канала вдоль трассы перемещения теплогенератора, с перемещаемым токопроводящим каналом, с 3-точечной пространственной схемой синхронно перемещаемых теплогенераторов и пр.).

Разработанный инструментарий позволяет выполнить сравнительный анализ вариантов разработки месторождения ГС по исходным данным физико-химических характеристик ископаемого.



Рисунок 8 – Динамика критерия *EROEI* при изменении скорости перемещения точечного генератора тепла внутри пласта ГС

### Литература

1 Проблемы и перспективы использования горючих сланцев в Украине / Осипов А. М., Шендрик Т.Г., Гришук С. В., Бойко З. В. // Материалы VIII Всероссийской конференции с международным участием «Горение твердого топлива» (Институт физико-органической химии и углехимии (ИнФОРУ) им. Л.М. Литвиненко Национальной академии наук Украины, Донецк, Украина; Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН). – Новосибирск, 2012.

2 Нефть сланцевых плев – новый вызов энергетическому рынку? / Грушевенко Д., Грушевенко Е.; под ред. Макарова А., Митровой Т., Кулагина В. // Центр изучения мировых энергетических рынков ИНЭИ РАН: Информационно-аналитический обзор. – Ноябрь 2012. – 49 с.

3 Энергетика на базе новых технологий использования низкосортных топлив / А.Ф. Гаврилов // Работы ОАО «Энергетический институт им. Кржижановского» (ЭНИИ), г. Москва. Режим доступа: <http://www.mtu-net.ru/lge/>.

4 Справочник по переработке горючих сланцев / [Барщевский М.М., Безмозгин Э.С., Шапиро Р.Н.] – Ленинград: Государственное научно-техническое издательство нефтяной и

горно-топливной литературы, Ленинградское отделение, 1963. – 239 с.

5 Пат. 87689, Украина, Способ подземной газификации углеводородсодержащего пласта / Баженов Е.В., Студеняк В.И., Троценко Э.А., Шварцман Л.Я – № и 2013 11803; заявл. 07.10.13; опубл. 10.02.14, Бюл. № 3. – 5 с. Режим доступа: <http://uapatents.com/12-87689-sposib-pidzemno-gazifikaci-vuglevodenvmisnogo-plasta.html>.

6 Обзор современных термических методов переработки горючих сланцев и экологические аспекты их применения / [Зюба О.Г., Глушченко О.Н.] // Нефтегазовая геология. Теория и практика. – 2012. – Т. 7. – № 4.

7 Мартинсон Л.К. Дифференциальные уравнения математической физики / Л.К. Мартинсон, Ю.И. Малов. – М.: Изд-во МГТУ им. Баумана Н.Э., 2002. – 368 с.

Стаття надійшла до редакційної колегії  
02.06.15

Рекомендована до друку  
професором Семенцовим Г.Н.  
(ІФНТУНГ, м. Івано-Франківськ)  
професором Критською Т.В.  
(Запорізька державна інженерна академія,  
м. Запоріжжя)