

IV МЕЖДУНАРОДНЫЙ КОНГРЕСС REENCON – XXI
Возобновляемая энергетика — XXI век:
энергетическая и экономическая эффективность
г. Москва, 5–6 июня 2018 г.

Перспективы развития гео- и петротермальной энергетики

С.В. АЛЕКСЕЕНКО

академик РАН,

Институт теплофизики СО РАН



Инновационная энергетика

Ближайшая перспектива:

Развитие экологически чистых и эффективных технологий переработки **органического** топлива (в частности, *парогазовые установки, ВУТ – водоугольное топливо, глубокая переработка угля типа газификации*).

Более дальняя перспектива (но начинать надо сейчас):

Освоение **ВИЭ** и разработка эффективных методов преобразования и хранения энергии.

Наиболее перспективные виды ВИЭ:

- **Солнечная энергия**
- **Геотермальная энергия** с постепенным переходом на **глубинное тепло** (тепло сухих пород Земли на глубинах 3 – 10 км при $t \leq 350^\circ\text{C}$).

Одно из оснований развивать **ВИЭ** – Парижское соглашение.



Установленная мощность ВИЭ в мире (2015 г.)

Источники	Электроэнергия, ГВт	Тепло, ГВт
Ветер	433	-
Фотоэлектричество	227	-
Солнечные ТЭС	4,8	-
Биомасса	106	-
Геотермальная энергия	13,2	-
Солнечные коллекторы	-	435

Суммарная установленная мощность (э) – **785 ГВт** (без Гидро).
Прирост мощности **ВИЭ** в год – **18%** (по **ФЭ** – **28%!**).
Вклад **ВИЭ** в производство электроэнергии – **7,3%**.



Геотермальная энергия

Страна	Получение электроэнергии на ГеоЭС		Прямое использование
	Мощность, МВт 2007г.	Мощность, МВт 2010 г.	Мощность, МВт 2000 г.
США	2687	3086	5366
Филиппины	1969.7	1904	1.0
Индонезия	992	1197	
Мексика	953	958	164.2
Италия	810.5	843	325.8
Новая Зеландия	471.6	628	307.9
Исландия	421.2	575	1469
Япония	535.2	536	257.5
Никарагуа	87.4	88	
Россия	79	82	307
Турция	38	82	820
КНР	27.8	24	2814
Франция	14.7	16	326
Всего	9,731.9	10,709.7	



Геотермальная энергия

ПРИПОВЕРХНОСТНОЕ ТЕПЛО – тепло подземных источников нагретой воды
ГИДРОГЕОТЕРМАЛЬНАЯ ЭНЕРГЕТИКА

ГЛУБИННОЕ ТЕПЛО (3 – 10 км) – тепло сухих пород с температурой до **350 °C**
ПЕТРОТЕРМАЛЬНАЯ ЭНЕРГЕТИКА

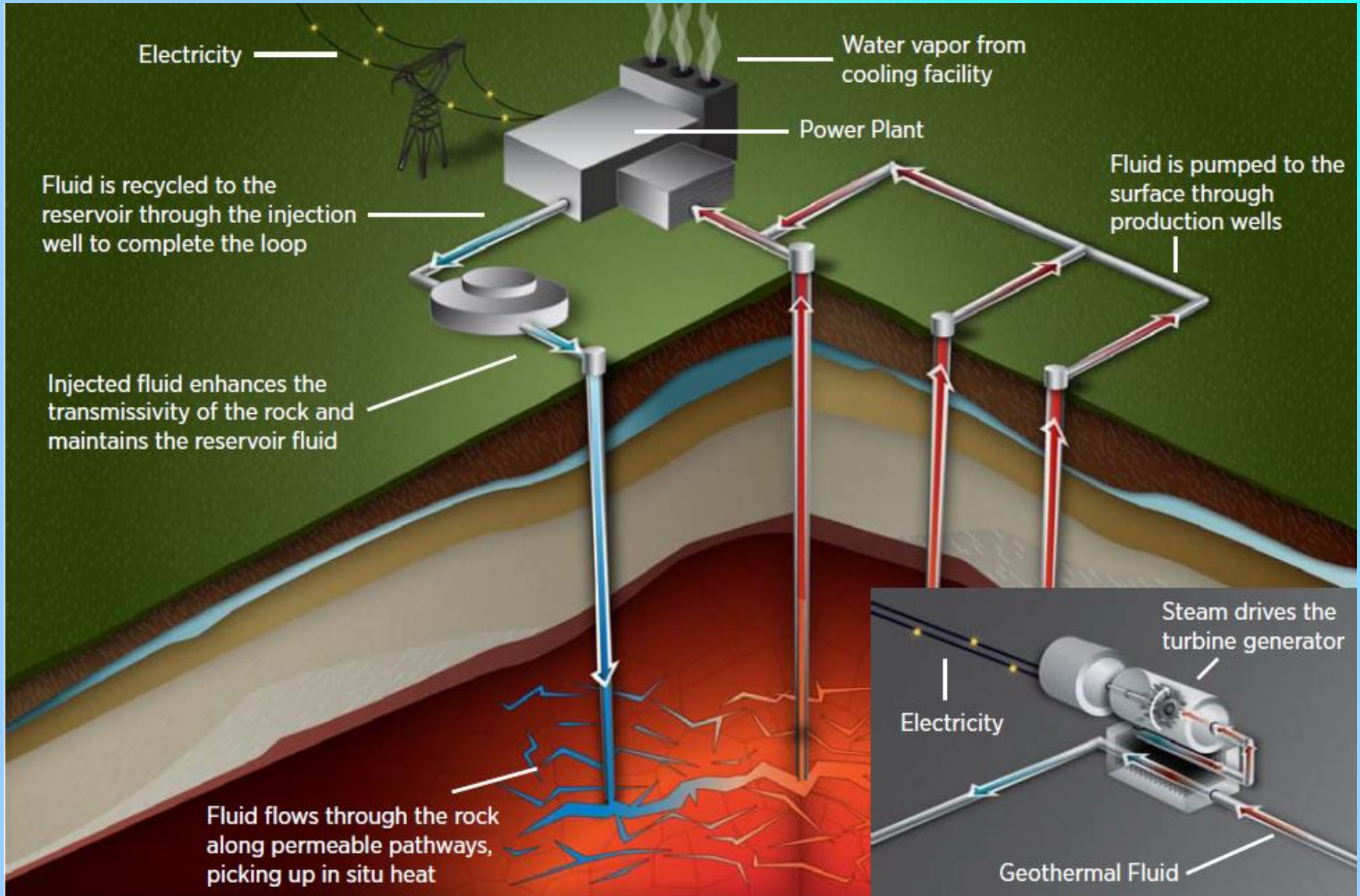
ТЕЗИС:
ПЕТРОТЕРМАЛЬНОЙ ЭНЕРГИИ достаточно, чтобы навсегда обеспечить человечество энергией!



МИРОВОЙ ОПЫТ ОСВОЕНИЯ ГЛУБИННОГО ТЕПЛА



Схема утилизации глубинного тепла





Петротермальная энергетика

ИСТОРИЯ

Идея извлечения геотермальной энергии твердых горячих пород была высказана **К.Э. Циолковским** в **1897** г. и более подробно описана в 1914 г. Он рассматривал нагревание воды за счет теплообмена с породами, имеющими на глубине **4 км** температуру **120°C** и ее циркуляцию в 2 отвесных каналах.

Первая технологическая схема геотермальной циркуляционной системы была предложена академиком **В.А. Обручевым** в **1920** г. в его повести “Тепловая шахта”.

1963 г. Первая ГЦС (геотермальная циркуляционная система), извлекающая тепло из пластов с естественной проницаемостью, была построена в Париже. К **1985** г. 64 ГЦС общей тепловой мощностью **450 МВт** обеспечивали теплом 154 тыс. квартир.

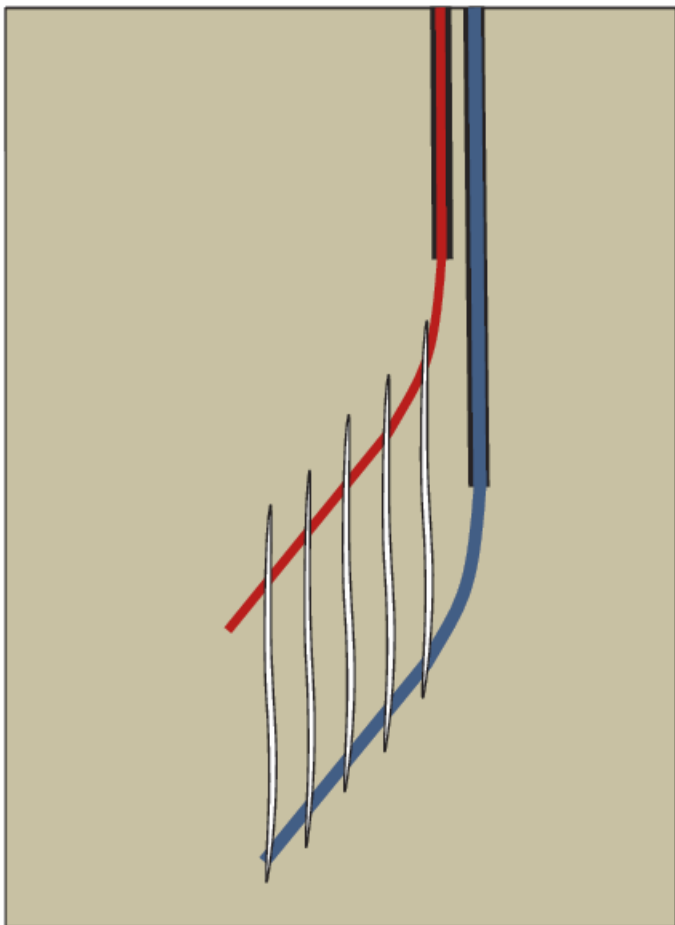
1970 г. В Лос-Аламосской национальной лаборатории США предложена ГЦС с искусственным коллектором из вертикальных трещин, создаваемых путем гидроразрыва в монолите. Название проекта **HDR (Hot Dry Rock)**.

В последние годы пошли по пути создания обширных резервуаров с множеством трещин, возникающих путем стимулирования естественных дефектов. Проекты типа **Enhanced Geothermal Systems (EGS)**.

Всего было реализовано около **двадцати** опытных систем типа **HDR** или **EGS**, которые подтвердили **техническую возможность** извлечения глубинного тепла с глубин до **5,1 км**.

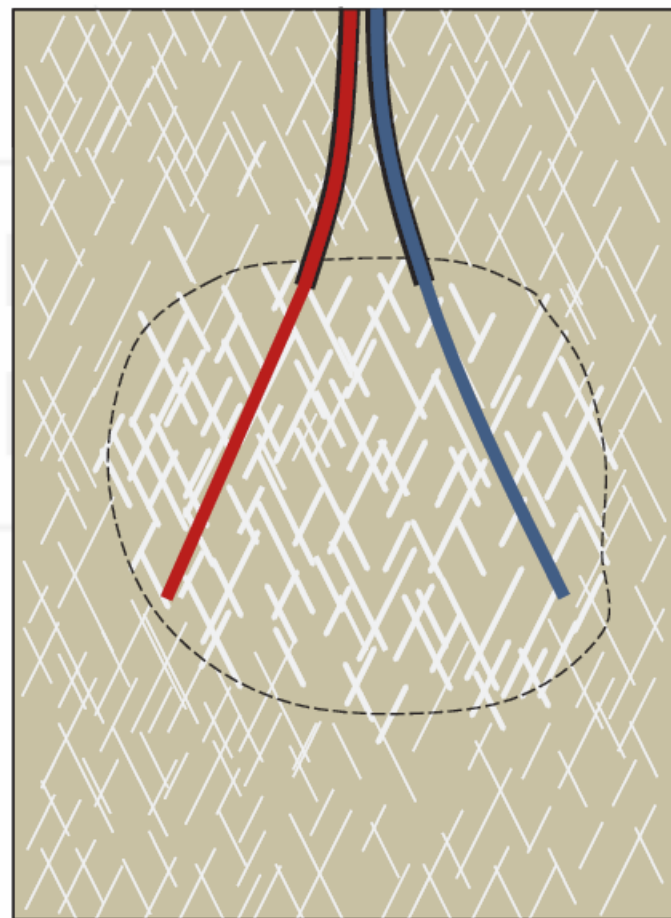


Типы циркуляционных систем



Hot Dry Rock (HDR)

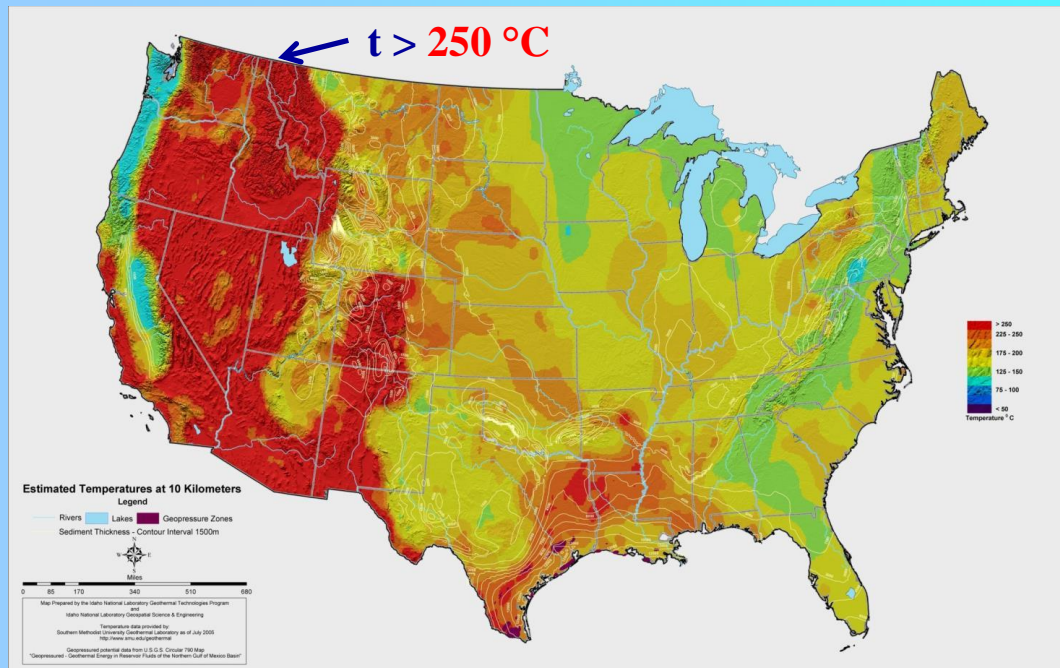
При гидроразрыве забойное **давление** должно в **1.8 - 2.5** раза превышать гидростатическое давление.



Enhanced Geothermal Systems (EGS)

Стимулирование естественных дефектов

Петротермальная энергетика в США



Распределения
глубинных температур
в США на глубине 10 км

• Извлекаемые запасы геотермальной энергии в США:

50 000 годовых потреблений энергии (!).

5 демонстрационных проектов по глубинному теплу.

В 2013 г. запущена первая коммерческая станция **1,7 МВт(э)**.

• Планы:

К 2030 г. достичь цены **6 ¢/kWh** за геотермальную энергию.

К 2050 г. достичь уровня **100 ГВт (!)** за счет глубинного тепла

(**10%** установленной электрической мощности в США или **40%** - в России).



Петротермальная энергетика в США

В **2018** г. в США затраты на НИОКР по глубинному теплу составили **51млн. \$**, в то время как на традиционную гидротермальную энергетику выделено **18 млн. \$**, а на **низкотемпературную** геотермальную энергетику (куда входят **бинарные** станции) – всего **8 млн. \$**.

EGS Program Priorities:

- EGS Roadmap
- FORGE Laboratory
- EGS R&D Projects



Выводы из анализа Enhanced Geothermal Systems

Требования к EGS

$H > 3$ км

Мощность $> (3 - 10)$ МВт

$t > 250$ °С

Расход воды $50 - 100$ кг/с

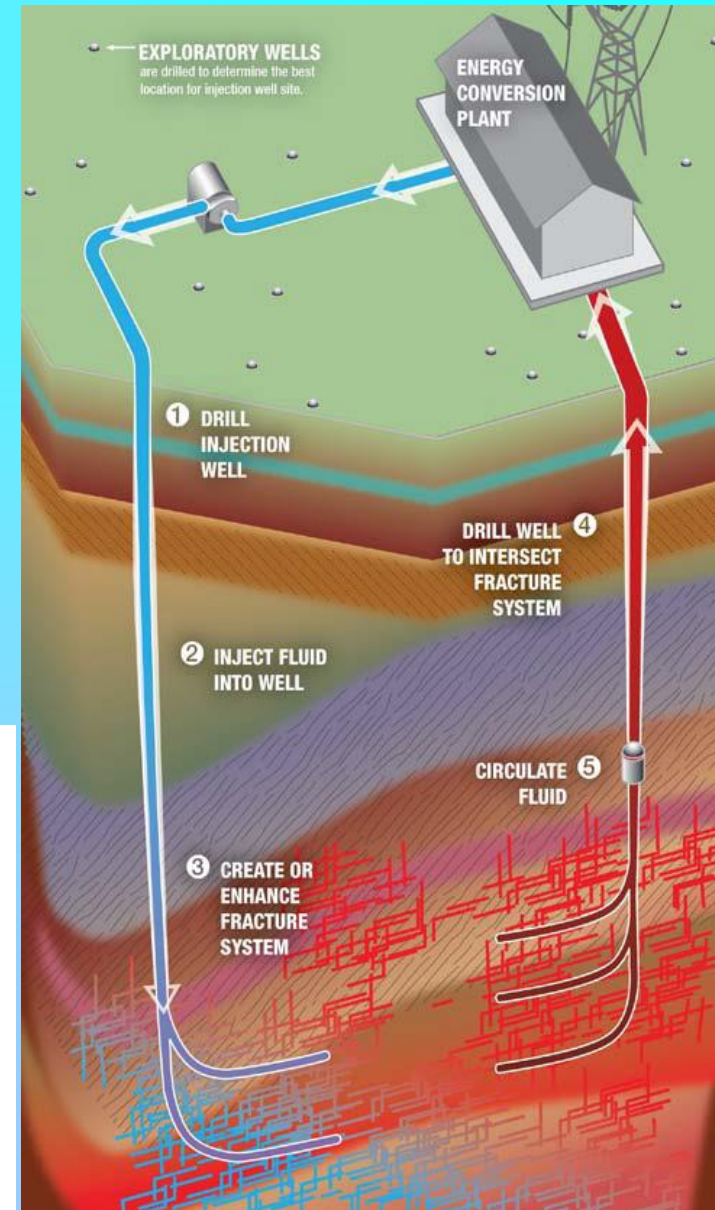
$T > 25$ лет

Расстояние между скважинами $0,5 - 2$ км

Объем резервуара $0,1 - 0,3$ км³

Технические проблемы

1. **Высокая цена бурения** (экспоненциальный рост с глубиной): **10 км – (1-2) млрд. руб.** Более **60%** от общих капитальных затрат.
2. **Неопределенность и малое время жизни** пары скважин.
3. **Создание подземного резервуара с достаточной проницаемостью.**
4. **Падение температуры со временем** (падение эффективности EGS).
5. **Малый КПД** извлечения тепла – **(1 - 5)%** от запаса.





СПОСОБЫ УТИЛИЗАЦИИ ГЕОТЕРМАЛЬНОГО ТЕПЛА



Способы утилизации геотермального тепла

- $t > 160 \text{ }^\circ\text{C}$ → ГеоЭС на сухом паре
- $t > 120 \text{ }^\circ\text{C}$ → ГеоЭС на пароводяной смеси
- $t > 70 \text{ }^\circ\text{C}$ → ГеоЭС с бинарным циклом
- $t \sim 100 \text{ }^\circ\text{C}$ → прямое теплоснабжение
- при **низкой** t → тепловые насосы



Бинарная ГеоЭС

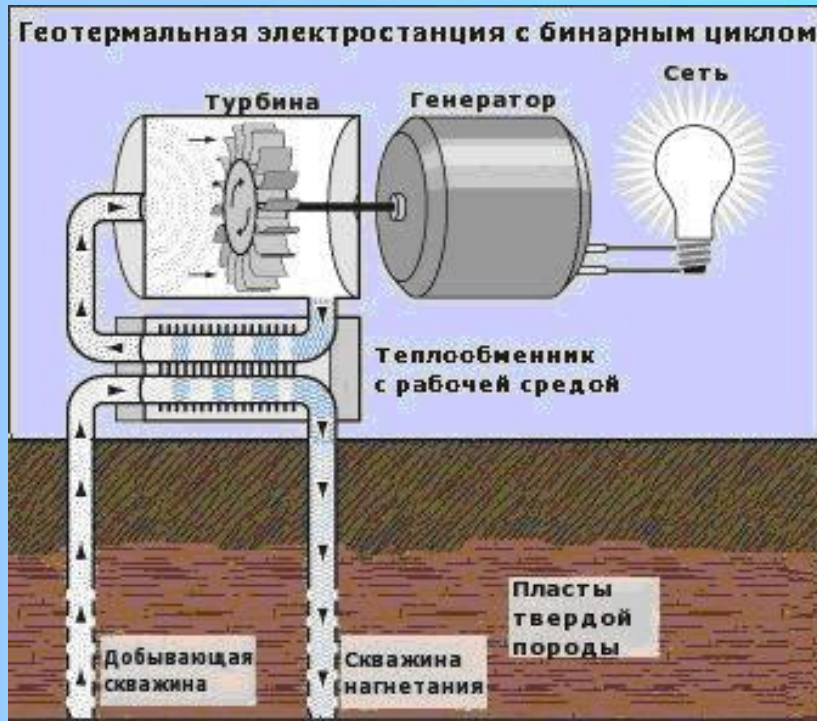
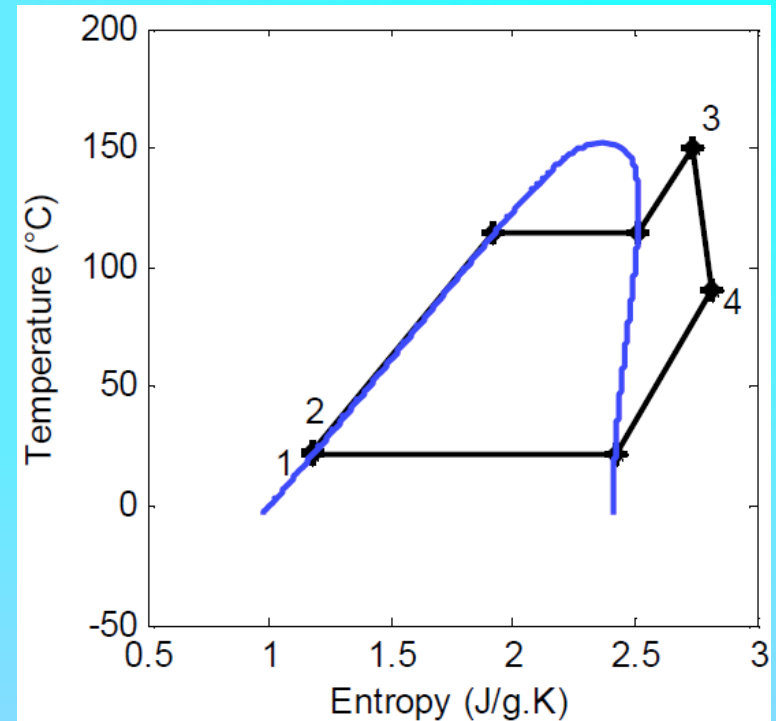


Схема Бинарной ГеоЭС



Organic Rankine Cycle (ORC)

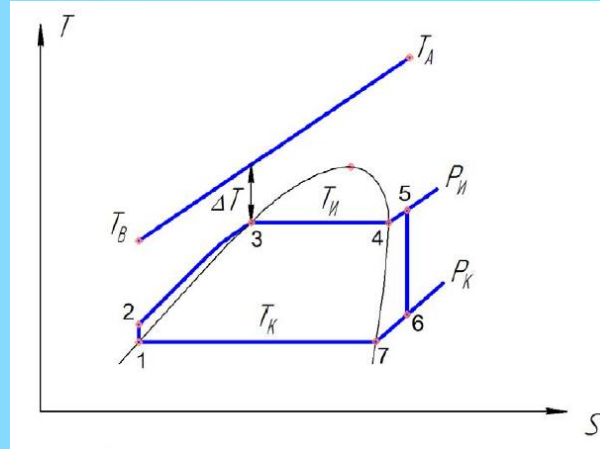
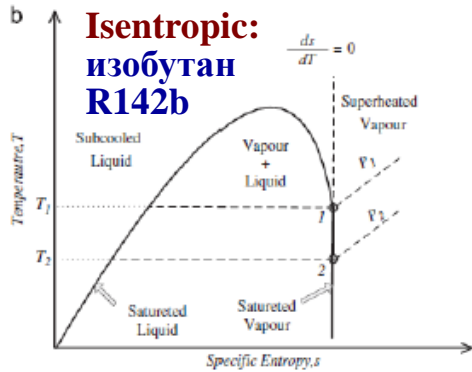
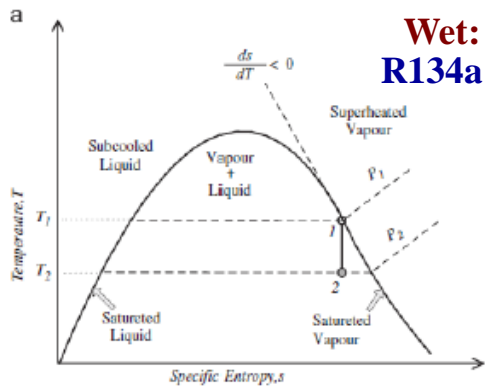
Первая в мире Бинарная ГеоЭС: Паратунская ГеоЭС (1967 - 1974).

Разработчик *ИТФ СО АН СССР*. Авторы технологии: *С.С. Кутателадзе, Л.М. Розенфельд*

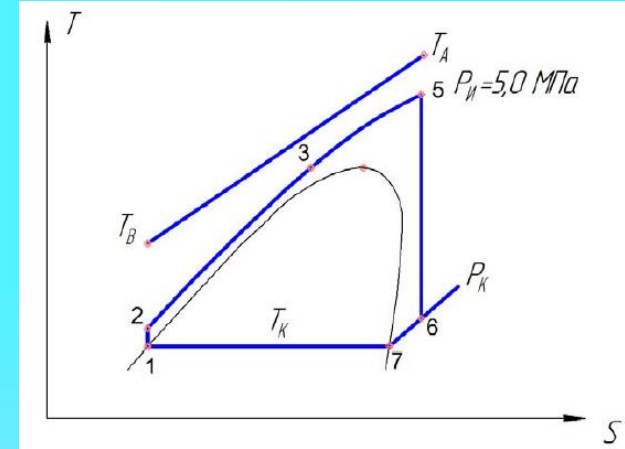
ORC эффективен при $t \leq 400^\circ\text{C}$ и мощности 1 кВт ÷ 10 МВт. В мире в эксплуатации 600 ТЭС на ORC общей мощностью 2 ГВт. Назначение: ВИЭ, тепловые выбросы.



Organic Rankine Cycles (ORCs): проблемы



Цикл паротурбинной установки в T,S-диаграмме и характер изменения температур теплоносителя



T,S-диаграмма сверхкритического цикла

Temperature Increase



320 K 365 K 395 K 420 K 445 K 465 K 500 K



R143a	R22	R152a	R600a	R600	R123
R32	R290	R124	R142b	R245fa	R365mfc
	R134a	CF ₃ I	R236ea	Neopentene	R601a
	R227ea	R236fa	Isobutene	R245ca	R601
			Butene		R141b

Рекомендуемые рабочие тела для бинарных циклов в зависимости от температуры теплового источника

Примеры кривых насыщения



ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ГЕОТЕРМАЛЬНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ В РОССИИ



ВИЭ в РОССИИ. Геотермия

Научный совет РАН по нетрадиционным возобновляемым источникам энергии:

Председатель научного совета

ПОПЕЛЬ О.С., д.т.н., ОИВТ РАН

Заместители председателя научного совета:

ФИЛИПШОВ С.П., академик РАН

АЛЕКСЕЕНКО С.В., академик РАН

АЛХАСОВ А.Б., д.т.н.

ЕЛИСТРАТОВ В.В. д.т.н.

**Технологическая Платформа
«Перспективные технологии
возобновляемой энергетики»**

ОАО «РусГидро»

Рабочие группы:

Гидроэнергетика;

Ветроэнергетика;

Энергетика приливов, волн и течений;

Солнечная энергетика;

Геотермальная энергетика;

Накопители энергии;

Водородная энергетика;

Другие технологии ВИЭ

Научный совет РАН по проблемам геотермии:

Председатель научного совета

ХУТОРСКОЙ М.Д., доктор геол.-мин. наук

Ученый секретарь научного совета

СВАЛОВА В.Б., к.ф.-м.н.

**Институт проблем геотермии
ДНЦ РАН**

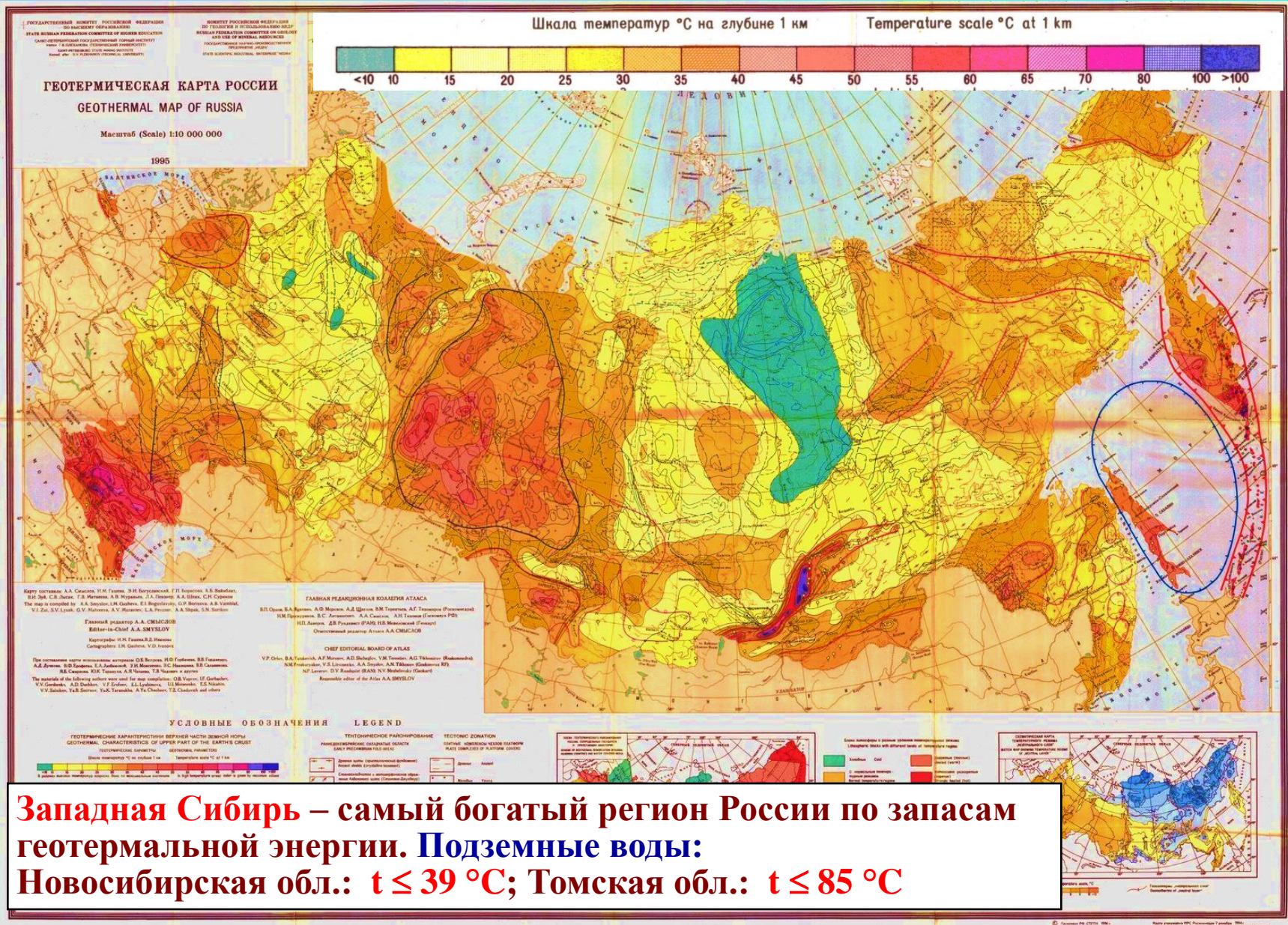
Директор АЛХАСОВ А.Б., д.т.н.

ООО «Геотерм-М»

Ген. директор ТОМАРОВ Г.В., д.т.н.



Геотермическая карта России





Гидрогеотермальная энергетика в России

ГеоЭС на сухом паре

В 1967 г. на юге Камчатки была построена первая в России ГеоЭС - Паужетская ГеоЭС мощностью 5 МВт.

Сегодня:

Камчатка:

Мутновская ГеоЭС = 50 МВт

Верхне-Мутновская ГеоЭС = 12 МВт

Паужетская ГеоЭС = 11 МВт

Курилы: 2 ГеоЭС = (2.6 + 6) МВт

Итого: 81,6 МВт



Мутновское
геотермальное
месторождение

Паужетская ГеоЭС



Гидрогеотермальная энергетика в России

Бинарная ГеоЭС (сегодня в России нет!)

Паратунская ГеоЭС (1967 - 1974)

Разработчик *ИТФ СО АН СССР*

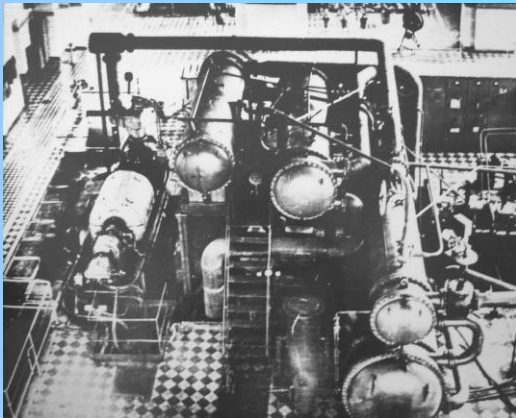
Авторы технологии: *С.С. Кутателадзе, Л.М. Розенфельд (1962)*

Исполнители: *Петин Ю.М., Москвичева В.Н.*

Впервые в мире применен бинарный цикл с фреоновой турбиной на фреоне **R-12** для выработки э/э из

геотермального источника:

Мощность **815 кВт**, $t_{\text{вода}} = 80\text{ }^{\circ}\text{C}$.



Паужетская Бинарная ГеоЭС (пусковые работы с 2012 г.)

Разработчики: *ЗАО «ГЕОИНКОМ»*

Мощность: **2,5 МВт**, $t_{\text{вода}} = 120\text{ }^{\circ}\text{C}$, фреон **R-134a**.

Контракт с *ИТ СО РАН* в **2015 г.** по проблемам пуска в эксплуатацию **первого в России бинарного блока.**

Верхне-Мутновская Бинарная ГеоЭС (проект)

Разработчики:

«Геотерм М»; МЭИ; ИТ СО РАН.

Мощность: **4 МВт**, $t_{\text{вода}} = 120\text{ }^{\circ}\text{C}$, фреон **R-134a**.



Петротермальная энергетика в России

ИСТОРИЯ

Идея извлечения геотермальной энергии твердых горячих пород была высказана **К.Э. Циолковским** в **1897 г.** и более подробно описана в **1914 г.** Он рассматривал нагревание воды за счет теплообмена с породами, имеющими на глубине **4 км** температуру **120°C** и ее циркуляцию в **2 отвесных каналах**, сообщающихся между собой за счет эффекта термолифта.

Первая технологическая схема геотермальной циркуляционной системы была предложена академиком **В.А. Обручевым** в **1920 г.** в его повести “Тепловая шахта”.

Исследования по извлечению геотермальной энергии слабопроницаемого массива горячих пород на основе ГЦС (геотермальной циркуляционной системы) проводились в Санкт-Петербургском горном университете под рук. проф. **Ю.Д. Дядькина** и в ИТФ СО АН СССР. Монография: **Дядькин Ю.Д., Гендлер С.Г., Смирнова Н.Н. Геотермальная теплофизика.** СПб.: Наука, **1993.**

1962 г. Предложения проф. **С.Н. Назарова** (Ташкент) о создании ГЦС с естественным коллектором, а затем акад. АН УССР **О.А. Кремлева** о создании крупных ГЦС глубиной до **6 км** и мощностью несколько **ГВт** для **Западной Сибири.**

Кабардино-Балкария: Создан гидроразрыв на глубине **3,7 км** при давл. **600 атм** и **t = 200°C.**

1981 г., Ханкала: Первая в России ГЦС с естественным коллектором в песчаниках.

1970 – 1990 гг.: Кольская сверхглубокая скважина (**12 260 м**).

1977 – 1982 гг.: Саатлинская сверхглубокая скважина в Закавказье (**8 267 м**, проект **15 км**).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Есть все основания развивать программу **петротермальной энергетики в России** с учетом имеющегося потенциала и ряда имеющихся преимуществ.

Реализация подобной программы позволит получить доступ к практически **неисчерпаемым** энергетическим ресурсам с полной **экологической безопасностью** и **полной независимостью** от внешних факторов!

Бурить можно **езде!**



Нормированная себестоимость производства электроэнергии в США (2020 г.)

Тип электростанции	Себестоимость, \$/МВт*ч
Природный газ – <i>обычные</i>	75
Угольные <i>обычные</i>	95
Природный газ – <i>усовершенствованные</i>	100
Угольные <i>усовершенствованные</i>	144
Атомные <i>усовершенствованные</i>	95
ГЭС	84
Ветровые	74
Фотоэлектрические	125
Биомасса	100
Геотермальные	48
Петротермальные (2030 г.)	60



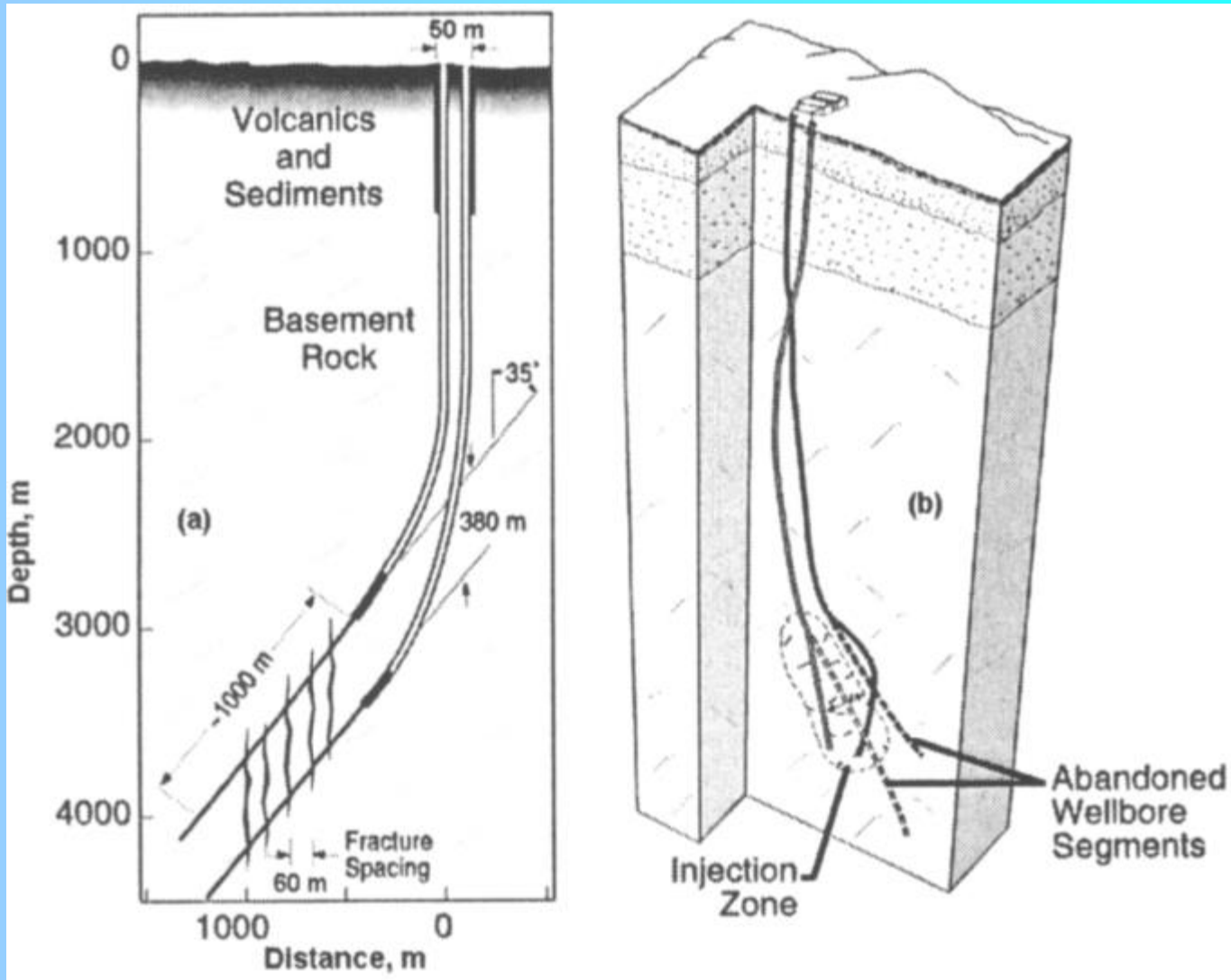
Предложения

1. Выполнить **интеграционный проект** с целью разработки предложений по развитию **геотермальной энергетики** в России с перспективой на освоение **глубинного тепла**.
2. В качестве образца по исполнению можно использовать опыт США (**Department of Energy**), в частности, проект **MIT: *The Future of Geothermal Energy. Impact of Enhanced Geothermal Systems (EGS) on the United States in the 21st Century. An assessment by an MIT-led interdisciplinary panel. 2006, 374 p.***
3. Результаты выполнения **Интеграционного проекта** использовать как основу для составления **Дорожной карты по развитию геотермальной энергетики в РФ**.



Спасибо за внимание!

Fenton Hill HDR (CWA, 1974 – 2000)



Fenton Hill HDR well configuration: (a) conceptual design, (b) actual.



ПАРАМЕТРЫ ЦИРКУЛЯЦИОННЫХ СИСТЕМ

Проект	Годы	Глубина, м	Темп. в скважине, С	Расстояние между скважинами, м	Расход, кг/с	Утечки воды, %	Тепловая мощность, МВт
FentonHill (США)	1974-1980	3064	200	100	7		3-5
	1979-2000	4390	327	380	12.5 - 15		
Rosemanowes (Великобр.)	1977-1983	2000	79	300	15		3
	1983-1991	2600	100		20-25	до 37	
Hijiori (Япония)	1989-2002	2151	270	50 - 130	16	до 45	8
Ogachi (Япония)	1990-1995	1100	240	100	2	<75	
Soulz (Франция)	1987-1997	3876	168	450	25		10
	1997 -	5105	200				
Cooper Basin (Австралия)	2003-н.вр	4421	250		25		
Decert Peak (США)	2002-2013	1766	170	400	100		1.7



ПЕТРОТЕРМАЛЬНАЯ ЭНЕРГЕТИКА В РОССИИ

Моделирование гидроразрыва пласта (ГРП)

ЭТАПЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Развитие трещины

- взаимодействие жидкости гидроразрыва с упругим пластом
- утечки и взаимодействие с пластовой жидкостью
- разрушение породы, сжимающие напряжения и проч.

Течение жидкости

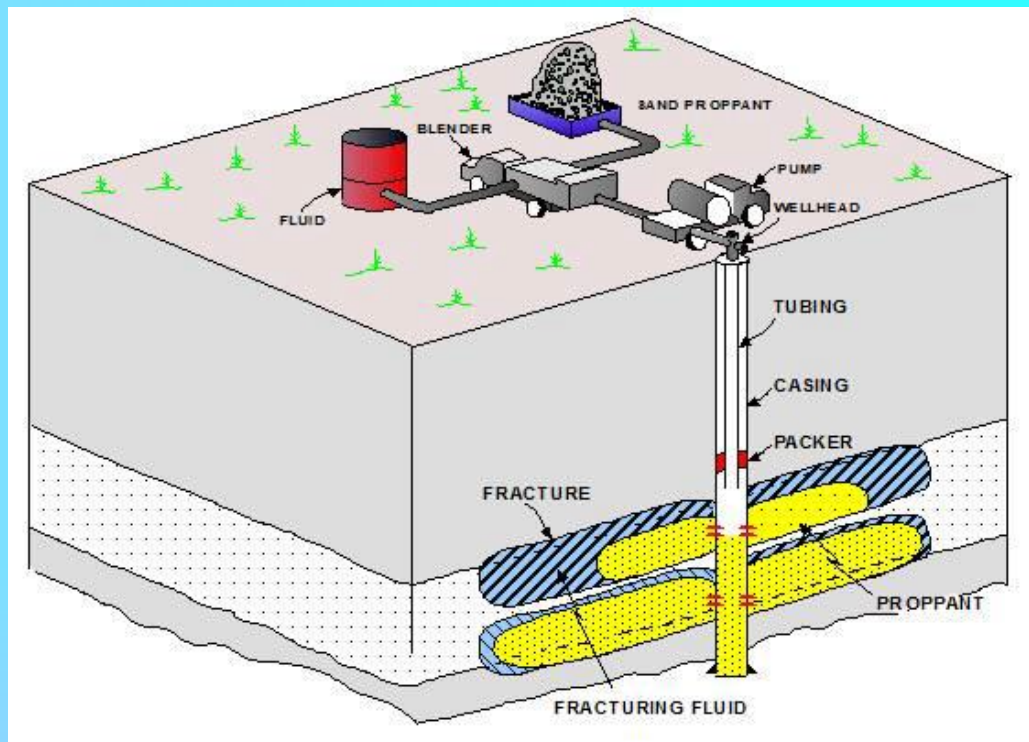
- взаимодействие жидкости гидроразрыва и проппанта
- транспорт проппанта
- возможные осложнения (оседание проппанта, закупорка трещины)

Трещина с множественными гидроразрывами

- оценка дебита
- взаимодействие трещин

Контроль трещины ГРП

- Определение длины и положения трещины ГРП



Разработка российского симулятора гидроразрыва пласта (ГРП)

Golovin, Baykin // Int. J. Sol. & Struct. (2015)

Ельцов, Мошкин, Шелухин, Энов // ДАН (2016)

Golovin et al. // Int. J. Rock. Mech. Min. Sci. (2015)



ПЕТРОТЕРМАЛЬНАЯ ЭНЕРГЕТИКА В РОССИИ

Расчет теплообмена в геотермальной циркуляционной системе

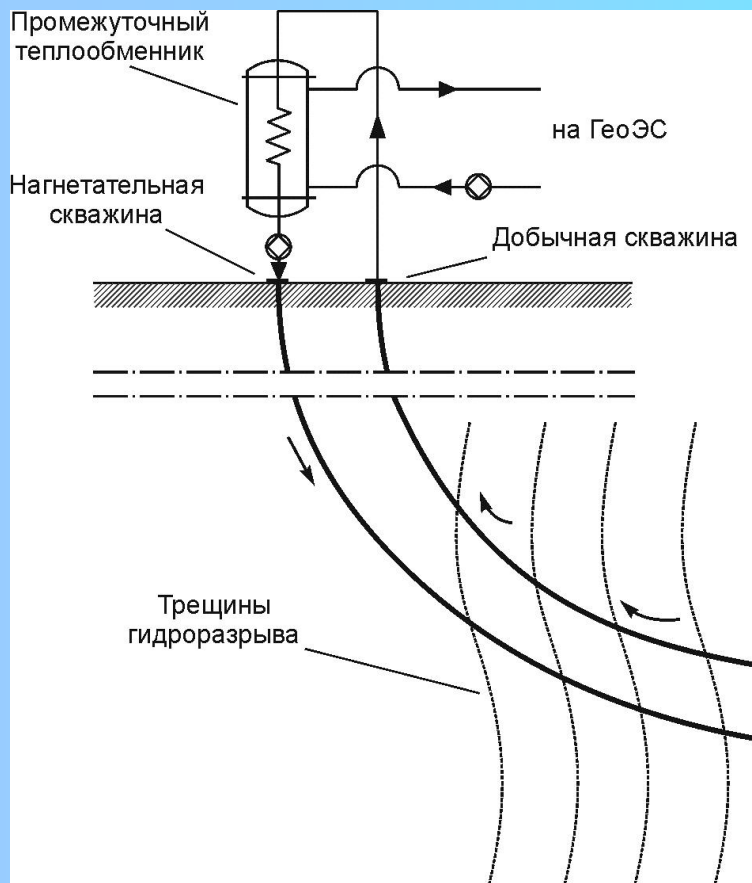


Схема геотермальной циркуляционной системы

Расход воды кг/с	τ , годы	
	$t_{зд} = 250^{\circ}\text{C}$	$t_{зд} = 150^{\circ}\text{C}$
12	44	49
14	36,5	40
16	32	38
18	28,5	33
20	24	29
40	11	15
60	7	10

Изменение срока службы петротермальной системы при допустимом снижении температуры на выходе из скважины в зависимости от расхода теплоносителя

Алексеев, Бородулин, Гнатусь, Низовцев, Смирнова (2016)