



# МГРИ

РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
ГЕОЛОГОРАЗВЕДОЧНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИМЕНИ СЕРГО ОРДЖОНИКИДЗЕ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

**Оперативный прогноз прорыва воды к  
добывающим скважинам  
в условиях неустойчивости фронта вытеснения  
при многофазной фильтрации флюидов**

«ИННОВАЦИОННЫЕ РЕШЕНИЯ В ГЕОЛОГИИ И  
РАЗРАБОТКЕ ТРИЗ», Москва, 28-30 октября 2025 г.

Шахвердиев А. Х.  
Денисов А.В.



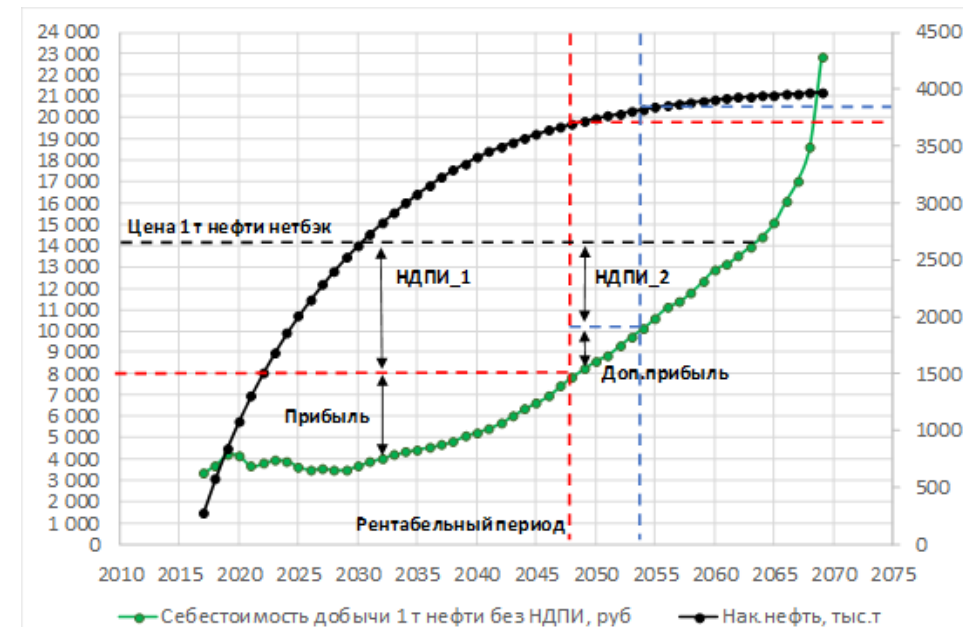
Кратное увеличение объемов добычи ТРИЗ нефти по категории относящейся к высокой степени выработанности запасов, к которым относятся объекты с обводненностью 90-98%

Накопившиеся к поздней стадии разработки проблемы связанные с поступлением воды в добывающие скважины:

- Поступление краевой и подошвенной воды;
- Образование каналов низкого фильтрационного сопротивления от нагнетательных скважин;
- Поступление воды ниже и вышележащих горизонтов через заколонные перетоки;
- Неустойчивость фронта вытеснения нефти водой;
- Формирование слабодренлируемых и застойных зон.

Доработка эксплуатационных объектов, находящихся на поздней стадии разработки, будет осуществляться еще продолжительное время, актуальной задачей является улучшение технологических и экономических показателей этого процесса.

Тип льготы	Добыча нефти (без СРП и добычи на новых морских месторождениях), млн т				
	2016	2017	2018	2019	2020
Бажен, абалак, хадум, доманик	2	1	1	2	2
Вязкость от 10 000 мПа*с	2	3	4	5	6
Вязкость от 200 до 10 000 мПа*с	5	5	6	6	8
Низкая проницаемость	8	12	18	20	21
Тюменская свита	26	26	28	28	27
<b>Итого:</b>	<b>42</b>	<b>47</b>	<b>56</b>	<b>56</b>	<b>64</b>
Величина запасов < 5 млн т	10	10	11	11	11
Льгота по региону добычи (Ккан)	36	37	37	28	24
Льгота по степени выработанности запасов	106	112	140	159	151
<b>Итого:</b>	<b>152</b>	<b>159</b>	<b>189</b>	<b>198</b>	<b>186</b>
<b>Не льготная нефть</b>	<b>305</b>	<b>288</b>	<b>250</b>	<b>202</b>	<b>151</b>
<b>ВСЕГО</b>	<b>498</b>	<b>494</b>	<b>495</b>	<b>456</b>	<b>401</b>





- нерешенная научно-методическая проблема теории Бакли-Лeverетта – наличие скачка водонасыщенности на фронте вытеснения нефти водой и многозначность ее значения при математической формализации двухфазного течения жидкости в пористой среде;
- фрактальная геометрия движения фронта вытеснения;
- «вязкостная» неустойчивость фронта вытеснения;
- «пальцеобразный» фронт вытеснения;
- «кинжальное» обводнение скважин;
- преждевременный прорыв воды в добывающих скважинах;
- образование застойных и слабодренлируемых зон и снижение КИН.

Mechanism of Fluid Displacement in Sands  
 BY S. E. BUCKLEY AND M. C. LEVERETT,\* MEMBERS A.I.M.E.  
 (New York Meeting, February 1941)

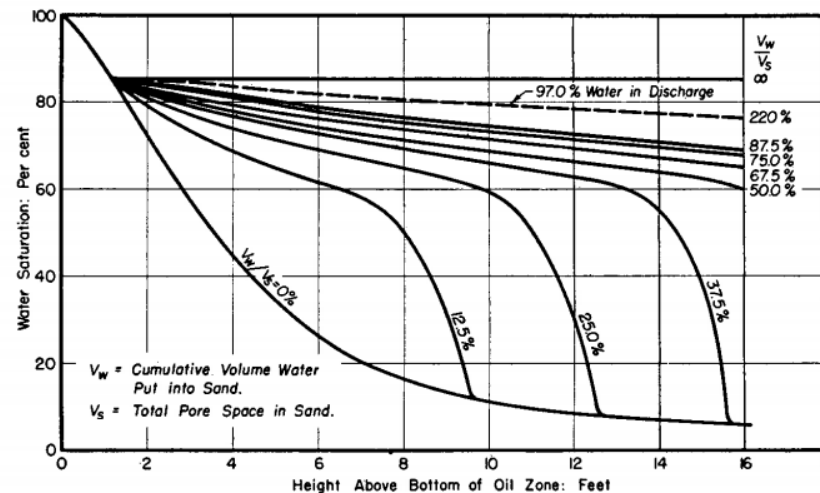


FIG. 4.—SATURATION HISTORY OF OIL-BEARING SAND UNDER WATER FLOOD.

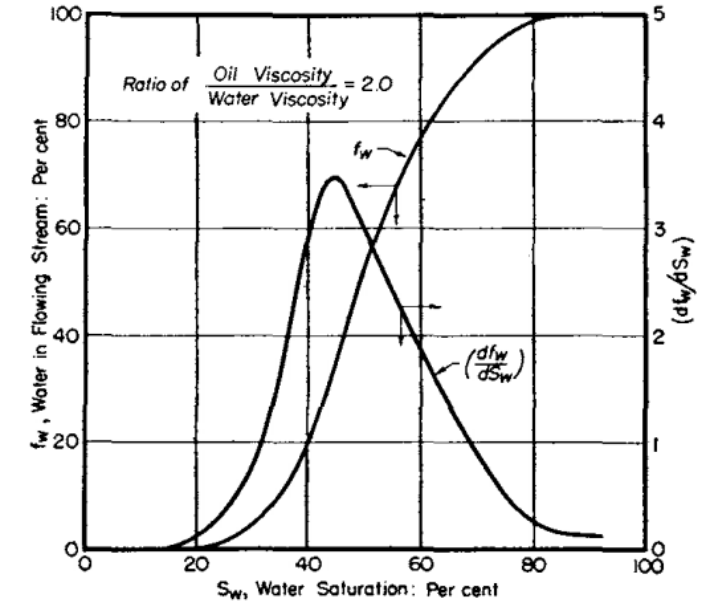


FIG. 2.— $f_w$  AND  $df_w/dS_w$  AS FUNCTION OF  $S_w$

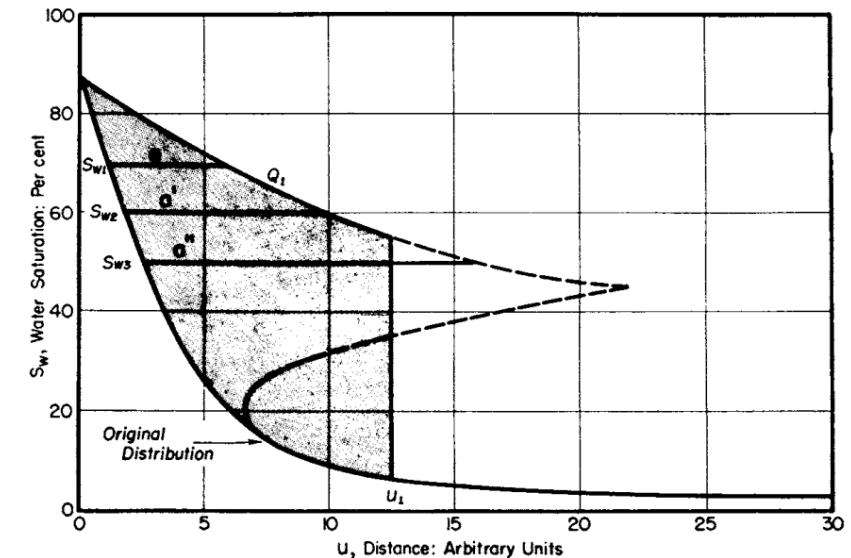


FIG. 3.—CALCULATION OF SATURATION HISTORY DURING WATER FLOOD.



Тематике двухфазного течения жидкости в пористой среде посвящено большое количество опубликованных работ с результатами теоретических и экспериментальных исследований:

В 1930 г. Лейбензон Л.С. вывел дифференциальные уравнения фильтрации.

Понятие фазовой проницаемости впервые было введено Виковым и Ботсетом в 1936 г.

Концепцию относительной проницаемости в конце 1930-х г. сформулировал Моррис Маскет.

Бакли и Леверетт в 1941 г. предложили модель совместного течения нефти и воды без учета капиллярного скачка насыщенности и действия гравитационных сил.

В 1953 г. Рапорт-Лис опубликовали систему уравнений, включающую в себя дополнительное уравнение, определяющее скачок давления на границе фаз.

В 1958 г. Сафман и Тейлор опубликовали результаты экспериментальных исследований нарушения устойчивости фронта вытеснения в виде неограниченно разрастающихся языков вытесняющей жидкости.

Математическая модель развития языков вытесняющей жидкости была предложена в 1984 г. Баренблаттом.

В настоящее время исследования в области физического моделирования на микроуровне и в области математического моделирования продолжаются и требуют отдельного обобщения.

Неоспоримый путь описания процессов фильтрации флюидов в пористой среде — построение системы нелинейных уравнений в частных производных, связывающих изменения во времени давлений и насыщенностей в пористой среде.

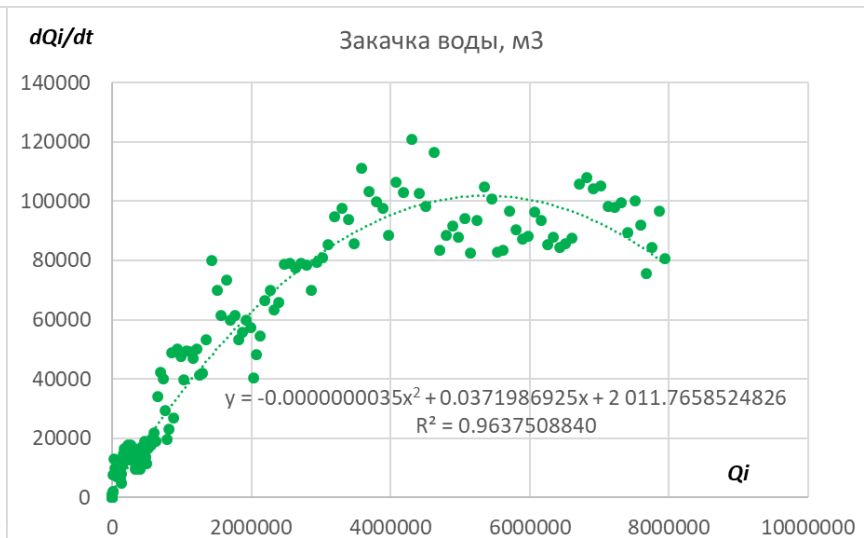
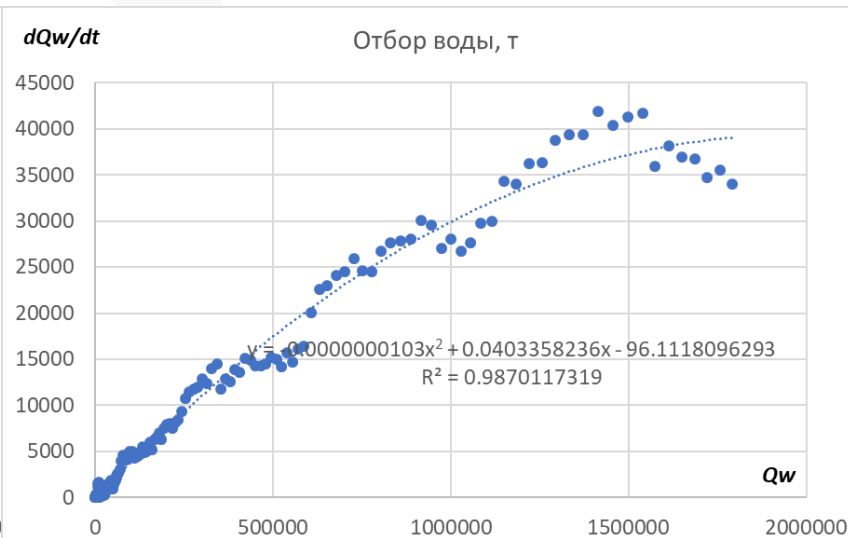
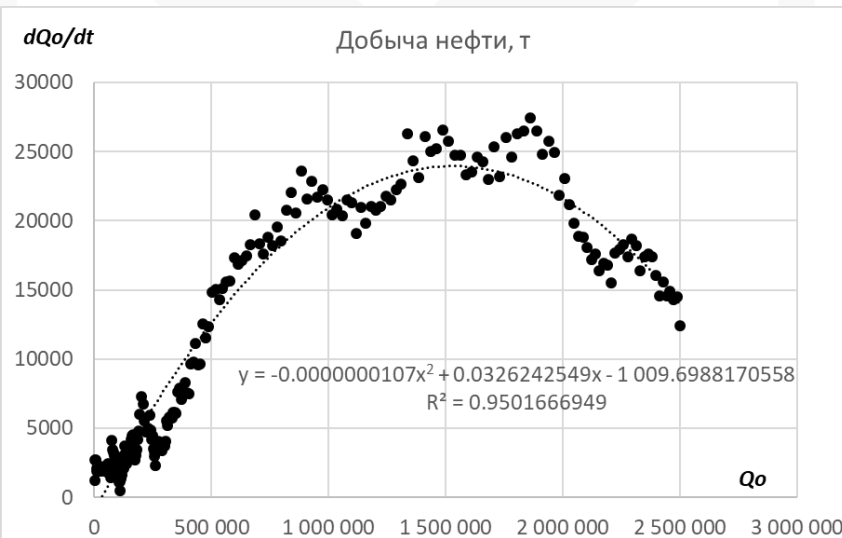
Поскольку процесс вытеснения одной жидкости другой в переходной зоне формируется в условиях геологической, физической неоднородности и локального взаимодействия гидродинамических, капиллярных, молекулярных, инерционных, гравитационных, электрокинетических и прочих сил, осложняющих процесс многофазной фильтрации, комплексный учёт взаимовлияния этих сил невозможен. Решение дифференциальных уравнений фильтрации с учетом всех изменяющихся параметров представляет сложную и зачастую невыполнимую задачу.



В КАЧЕСТВЕ ДОПОЛНЕНИЯ К КЛАССИЧЕСКОЙ МНОГОМЕРНОЙ И МНОГОФАЗНОЙ ФИЛЬТРАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ПРЕДЛАГАЕТСЯ ИСПОЛЬЗОВАТЬ В КАЧЕСТВЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ МАЛОПАРАМЕТРИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ РОСТА НЕУСТОЙЧИВОГО МНОГОФАЗНОГО ПОТОКА И ИССЛЕДОВАТЬ ИХ МЕТОДАМИ ТЕОРИИ КАТАСТРОФ

Динамическая система (ДС)

$$\frac{dQ_i}{dt} = a_i Q_i^2 + b_i Q_i + c_i, \quad i=o; w; z \quad (1)$$





Производное от (1) уравнение

$$\frac{dQ_w}{dQ_o} = \frac{a_w Q_w^2 + b_w Q_w + c_w}{a_o Q_o^2 + b_o Q_o + c_o} \quad (2)$$

С целью построения качественной теории полиномиальных квадратичных ДС и введения *дискриминантного критерия* качественной теории, определены классы:

- $D^{++}$ :  $D_o = b_o^2 - 4a_o c_o > 0$  и  $D_w = b_w^2 - 4a_w c_w > 0$ ;
- $D^{-+}$ :  $D_o < 0$  и  $D_w > 0$ ;
- $D^{+-}$ :  $D_o > 0$  и  $D_w < 0$ ;
- $D^{--}$ :  $D_o < 0$  и  $D_w < 0$ .

Получены общие решения уравнения (2) во всех классах сочетания дискриминант (таблица на сл.слайде)

Более подробно результаты исследования представлены в работах:

*Qualitative analysis of quadratic polynomial dynamical systems associated with the modeling and monitoring of oil fields/ Shakhverdiev A. Kh. And Shestopalov Yu.V. // Lobachevskii Journal of Mathematics. Pleiades Publishing, Ltd., 2019, vol. 40, №10, pp.1695-1710.*

*Qualitative theory of two-dimensional polynomial dynamical systems / Shestopalov Y., Shakhverdiev A. // Symmetry. 2021. Т. 13. № 10.*

*Three-phase dynamical systems and their applications to monitoring for the development of hydrocarbon fields / Shestopalov Yu.V., Shakhverdiev A.Kh. // Журнал Лобачевского по математике. 2023. Т. 44. № 11. С. 5045-5056.*

*Bifurcations associated with three-phase polynomial dynamical systems and complete description of symmetry relations using discriminant criterion / Shestopalov Y.V., Shakhverdiev A.Kh., Arefiev S.V. // Symmetry. 2024. Т. 16. № 1.*



	Класс	Пример уравнения	Общие решения $\frac{dQ_W}{dQ_O} = \frac{a_W Q_W^2 + b_W Q_W + c_W}{a_O Q_O^2 + b_O Q_O + c_O}$ , $Q_O^0 = \frac{b_O}{2a_O}$ , $Q_W^0 = \frac{b_W}{2a_W}$
1	D <sup>++</sup>	$\frac{dQ_W}{dQ_O} = \frac{Q_W(Q_W - 1)}{Q_O(Q_O - 1)}$	$Q_W(Q_O; C) = Q_W^1 - \frac{\sqrt{D_W}}{a_W \left( -1 + C \left  \frac{Q_O - Q_O^0}{Q_O - Q_O^1} \right ^\rho \right)}$ , $\rho = \sqrt{\frac{D_W}{D_O}} > 0$ .
2	D <sup>+0</sup>	$\frac{dQ_W}{dQ_O} = \frac{Q_W^2}{Q_O(Q_O - 1)}$	$Q_W(Q_O; C) = Q_W^0 + \frac{1}{\frac{a_W}{\sqrt{D_O}} \ln \left  \frac{Q_O - Q_O^0}{Q_O - Q_O^1} \right  + C}$ ,
3	D <sup>0+</sup>	$\frac{dQ_W}{dQ_O} = \frac{Q_W(Q_W - 1)}{Q_O^2}$	$Q_W(Q_O; C) = Q_W^1 + \frac{\sqrt{D_W}}{a_W} \frac{1}{1 + C e^{\frac{\sqrt{D_W}}{a_O(Q_O + Q_O^0)}}$
4	D <sup>00</sup>	$\frac{dQ_W}{dQ_O} = \frac{Q_W^2}{Q_O^2}$	$Q_W(Q_O; C) = Q_W^0 - \frac{1}{\frac{a_W}{a_O(Q_O^0 - Q_O)} + C}$
5	D <sup>-+</sup>	$\frac{dQ_W}{dQ_O} = \frac{Q_W^2 + 1}{Q_O(Q_O - 1)}$	$Q_W(Q_O; C) = -Q_W^0 + P \tan \left( \frac{\rho}{2} \ln \left  \frac{Q_O - Q_O^0}{Q_O - Q_O^1} \right  + C \right)$ , $\rho = \sqrt{-\frac{D_W}{D_O}} > 0$ , $P = \frac{\sqrt{-D_W}}{2a_W}$
6	D <sup>-+</sup>	$\frac{dQ_W}{dQ_O} = \frac{Q_W(Q_W - 1)}{Q_O^2 + 1}$	$Q_W(Q_O; C) = Q_W^1 - \frac{\sqrt{D_W}}{P} \frac{1}{-1 + C e^{-2\rho \tan^{-1} \left( \frac{Q_O^0 + Q_O}{P} \right)}}$ , $\rho = \sqrt{-\frac{D_W}{D_O}} > 0$ , $P = \frac{\sqrt{-D_O}}{2a_O}$
7	D <sup>-</sup>	$\frac{dQ_W}{dQ_O} = \frac{Q_W^2 + 1}{Q_O^2 + 1}$	$Q_W(Q_O; C) = -Q_W^0 + P_2 \tan \left( \rho \tan^{-1} \left( \frac{Q_O^0 + Q_O}{P_1} \right) + C \right)$ , $\rho = \sqrt{\frac{D_W}{D_O}} > 0$ , $P_1 = \frac{\sqrt{-D_O}}{2a_O}$ , $P_2 = \frac{\sqrt{-D_W}}{2a_W}$
8	D <sup>0-</sup>	$\frac{dQ_W}{dQ_O} = \frac{Q_W^2 + 1}{Q_O^2}$	$Q_W(Q_O; C) = Q_W^0 + P \tan \left( \frac{\sqrt{-D_W}}{2} \left( \frac{1}{a_O(Q_O^0 - Q_O)} + C \right) \right)$ , $P = \frac{\sqrt{-D_W}}{2a_W}$
9	D <sup>0</sup>	$\frac{dQ_W}{dQ_O} = \frac{Q_W^2}{Q_O^2 + 1}$	$Q_W(Q_O; C) = Q_W^0 - \frac{1}{\frac{2a_W}{\sqrt{-D_O}} \tan^{-1} \left( \frac{Q_O^0 + Q_O}{P} \right) + C}$ , $P = \frac{\sqrt{-D_O}}{2a_O}$

Дискриминанты полиномов, а также их знаки («+» или «-») являются управляющими параметрами, контролирующими существенные особенности и свойства решений.

Формирование катастрофических изменений решений в рамках различных сценариев развития катастроф происходит при смене знака одного из дискриминантов квадратных трехчленов, то есть при переходе из одного класса D<sup>±</sup> в другой.

Последнее соответствует переходу системы, описываемой ДС, из одного состояния в качественно другое.

При этом каждый класс соответствует особой структуре кривых решений. Изменение этой структуры, в том числе катастрофическое, сопровождающееся появлением новых типов частных решений, которые отсутствуют в “предыдущем” классе, происходит при вариации одного параметра – дискриминанта D<sub>o</sub> или D<sub>w</sub> одного из трехчленов.

Класс D<sup>++</sup> играет при этом особую роль как “источник” таких изменений, поскольку, именно в этом классе решения имеют наибольшее количество критических точек (четыре).

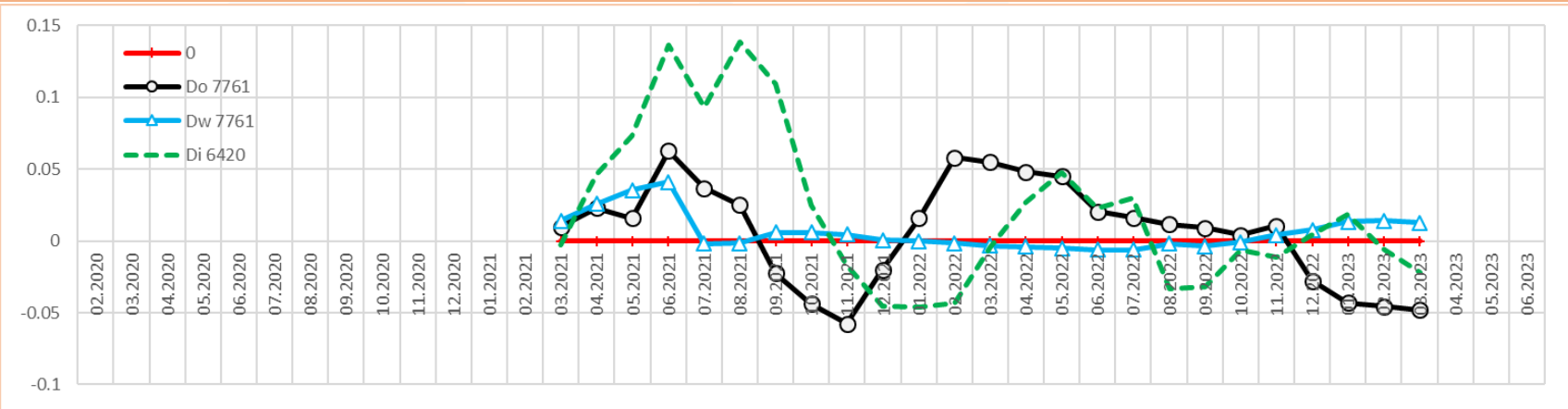
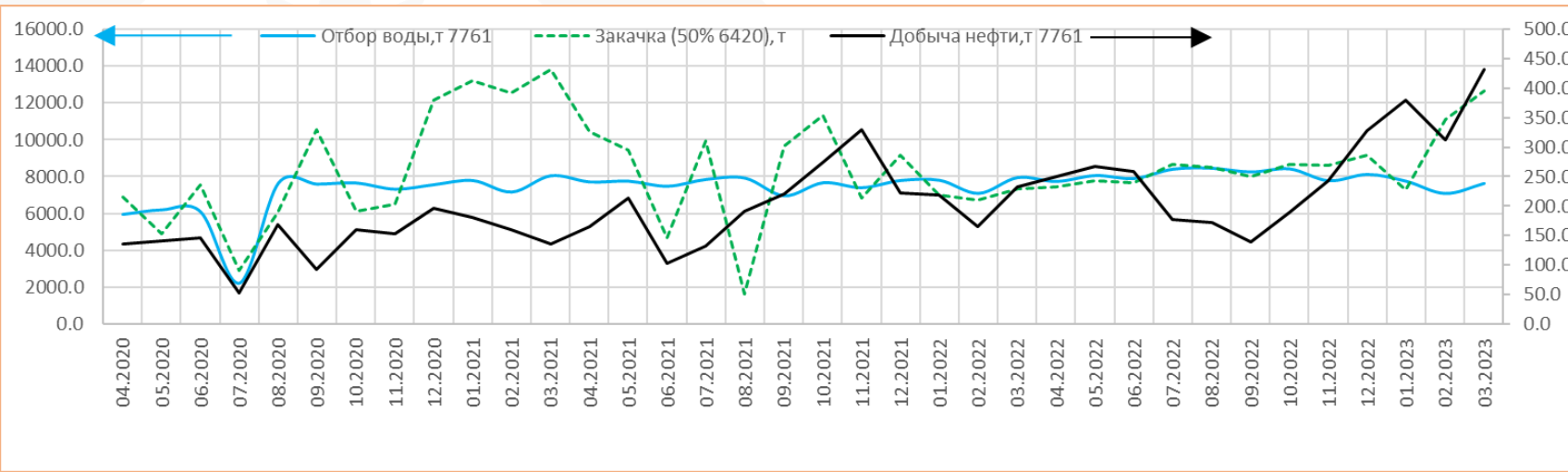
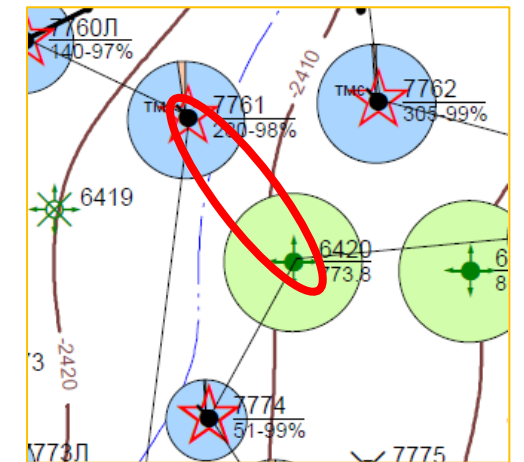
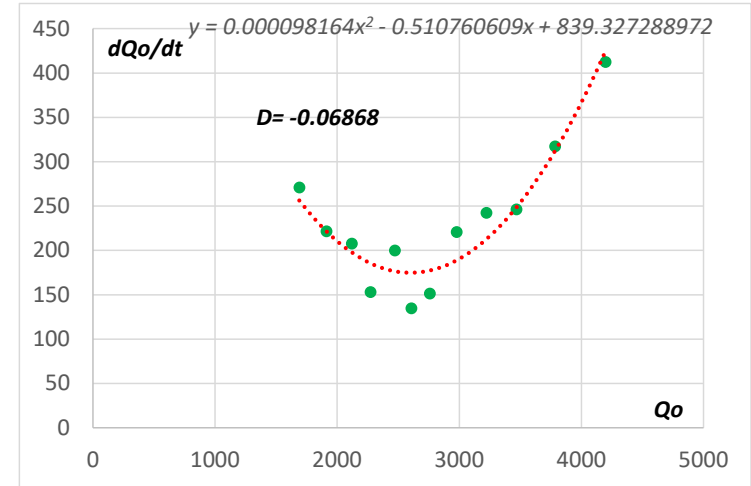


определение коэффициентов  $a_p$ ,  $b_p$ ,  $c_i$  при помощи МНК, при известных  $Q_i$  и  $q_i$

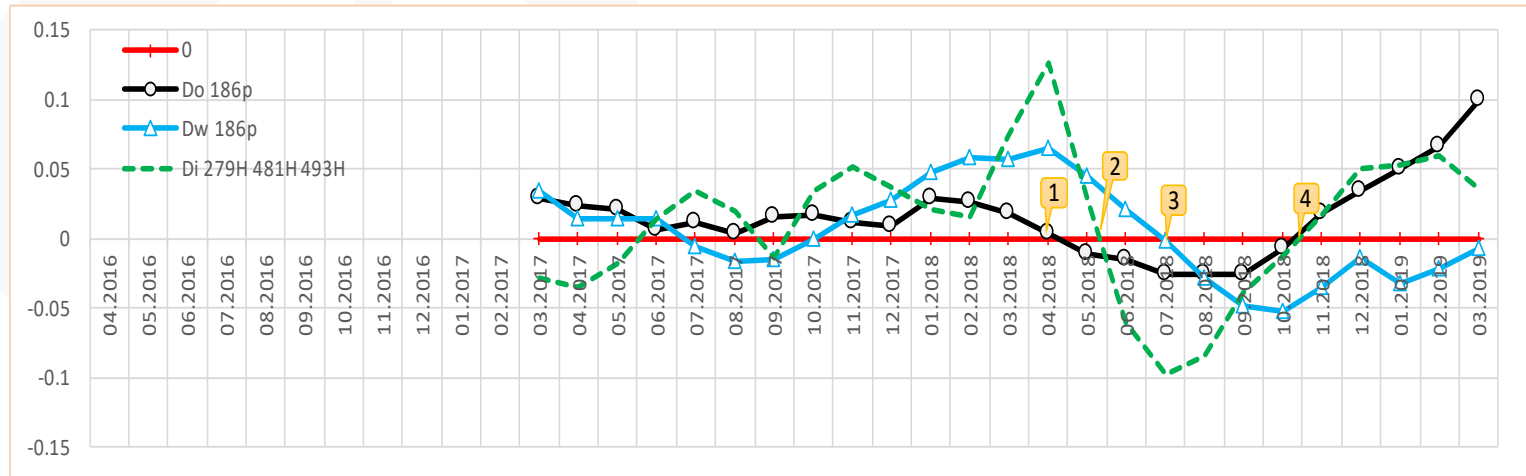
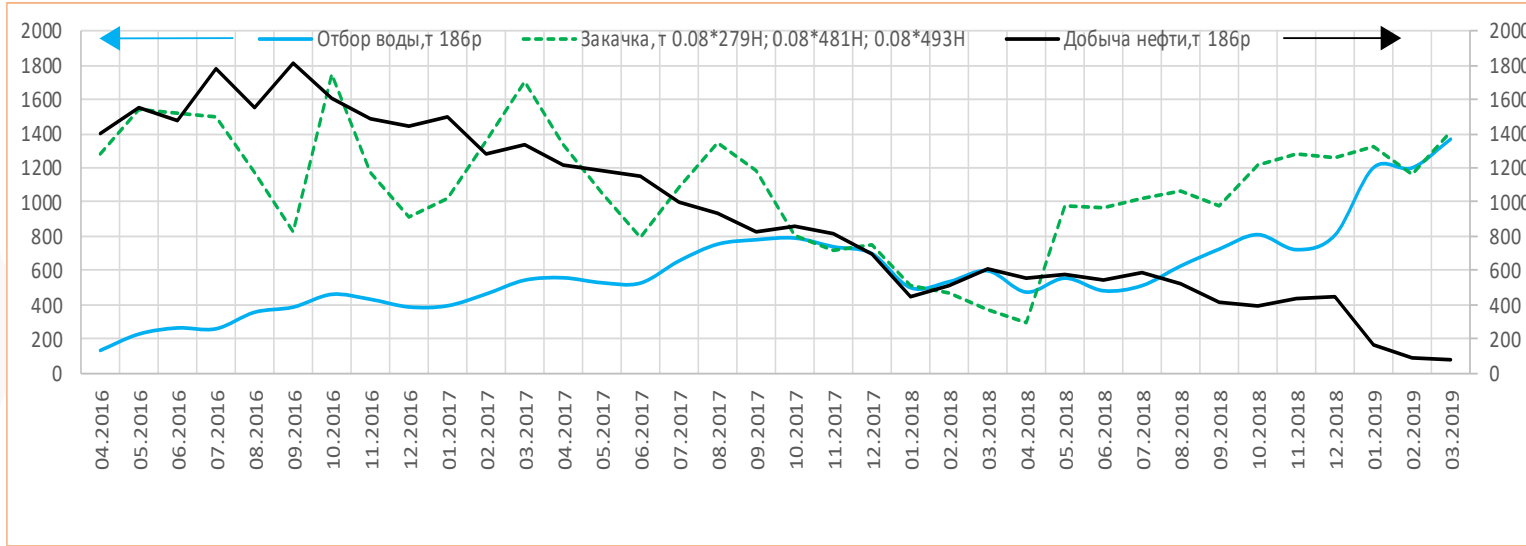
затем определение

$$D_i = b_i^2 - 4a_i c_i$$

$D_0 > 0$



# Решение обратной задачи, примеры:





Шахвердиев А. Х., Арефьев С. В., Давыдов А. В. Проблемы трансформации углеводородного сырья в нерентабельную категорию трудноизвлекаемых // Нефтяное хозяйство, 2022, №4, – С. 38-43

Шахвердиев А.Х. Оптимизация системы поддержания пластового давления при заводнении залежей // Нефтяное хозяйство. 2001. № 3. –С. 42-44.

Шахвердиев А.Х. Системная оптимизация процесса разработки нефтяных месторождений. – М.: Недра. 2004. – 452 с.

Шахвердиев А.Х. Еще раз о нефтеотдаче // Нефтяное хозяйство. 2014. № 1. –С. 44-48.

Шахвердиев А.Х. Мандрик И.Э., Панахов Г.М. Научно-методические и технологические основы оптимизации процесса повышения нефтеотдачи пластов. – М.: Нефтяное хозяйство. 2010. – 420 с.

Шахвердиев А.Х., Мандрик И.Э. Оптимизация плотности сетки скважин и ее влияние на коэффициент извлечения нефти // Нефтяное хозяйство. 2007. № 12. –С. 54-58.

Шахвердиев А.Х., Арефьев С.В., Денисов А.В., Юнусов Р.Р. Методика восстановления оптимального режима функционирования системы пласт - скважина с учетом неустойчивости фронта вытеснения. Нефтяное хозяйство. 2020. № 6. С. 52-57.



Предлагаемые новые решения прямой и обратной задачи теории катастроф, позволяют своевременно учесть последствия неустойчивости фронта вытеснения и прогнозировать последствия естественного скачкообразного изменения и тройственности водонасыщенности, полученного в теории Бакли-Левретта.

Построена полная качественная теория подобных динамических систем, включающая исчерпывающий анализ всех их особых точек и особенностей решений. Исследованы свойства решений на фазовых плоскостях самих параметров и времени.

Показана возможность использования дискриминант полиномов в качестве управляющих параметров, контролирующих существенные свойства решений, предложена классификация решений в зависимости от значений и знаков дискриминантов и принадлежности к конкретному семейству  $D^{++}$ ,  $D^{+-}$ ,  $D^{-+}$ ,  $D^{--}$  и так далее.

На основе предложенных критериев, впервые сформулированы решающие правила, позволяющие своевременно обнаружить и предотвратить последствия потери устойчивости фронта вытеснения нефти водой и скорректировать систему заводнения с помощью регулирования режимов работы, в том числе остановки, форсирования, ограничения отбора жидкости, назначения ГТМ добывающих и нагнетательных скважин, смены насосного оборудования. Мобилизацией закачиваемой воды и регулированием отбора жидкости, точнее воды и нефти на основе дискриминантного критерия, удаётся оперативно решить важные краткосрочные практические задачи в обход традиционных трудоёмких детерминистических задач и сложных методов их решения.

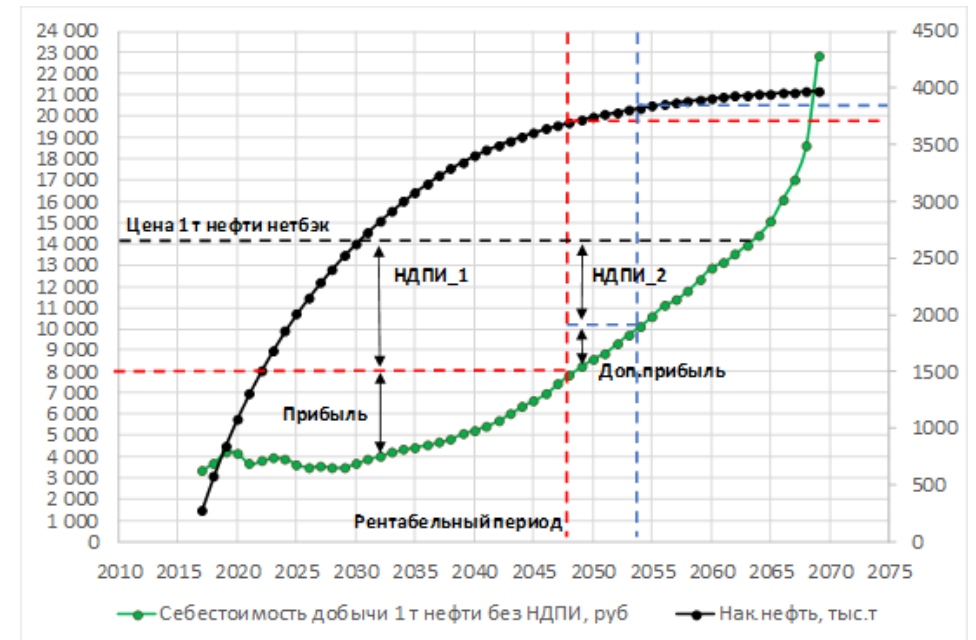
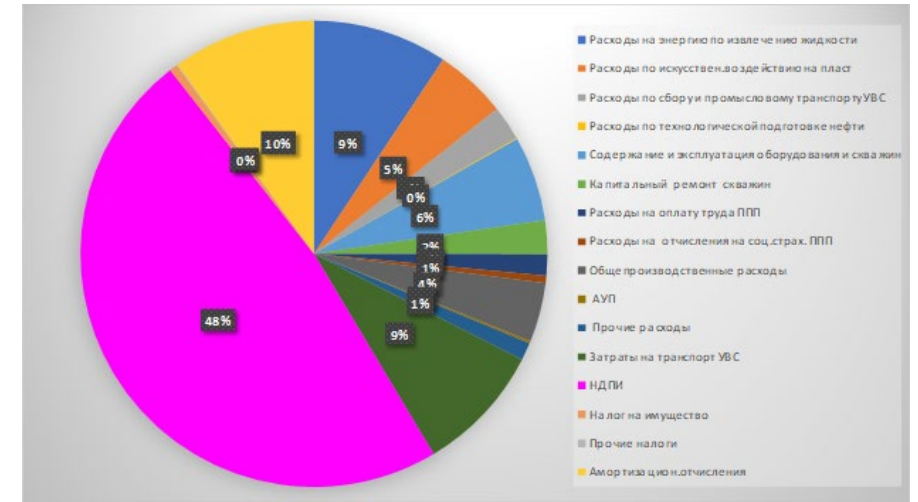


Методика по планированию, учету и калькулированию себестоимости добычи нефти и газа от 29.12.1995 г. нуждается в обновлении и доработках в части ТриЗ, с добавлением затрат на НИР, НИОКР, патентные разработки, дополнительные программы исследований.

Себестоимость добычи 1 тонны нефти без НДСПИ может являться унифицированным качественным показателем для контроля критической рентабельности разработки любого эксплуатационного объекта, в том числе ТриЗ и может использоваться для обоснования условий получения налоговых льгот.

Целесообразно создание базы данных с фактическими данными производственной себестоимости (без НДСПИ) добычи тонны нефти (по месяцам, кварталам, годам) по эксплуатационным объектам разработки для возможности экспертной оценки, сравнения проектов по льготизируемым категориям и контроля рентабельности.

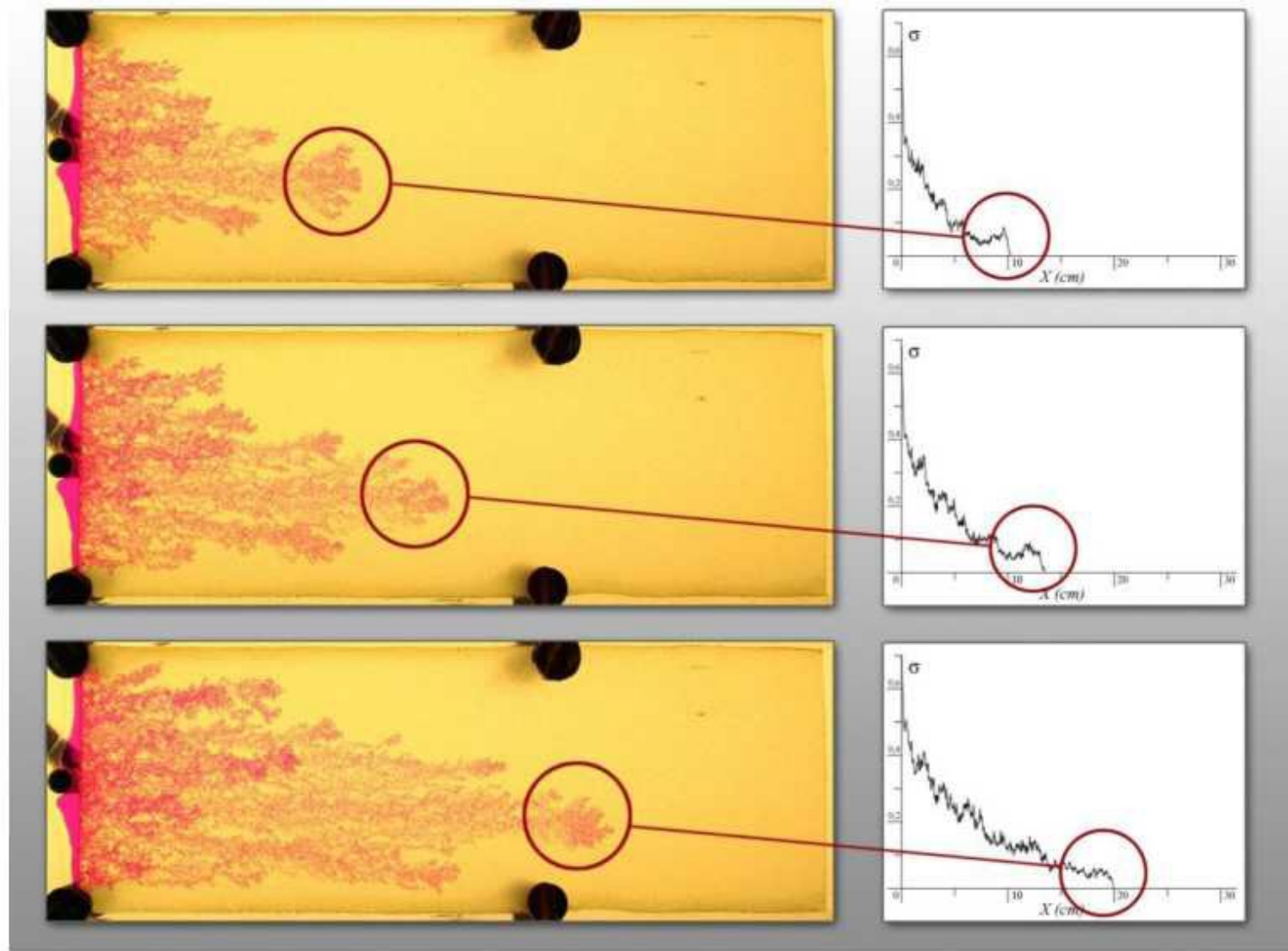
Временное снижение ставки НДСПИ представляется эффективным инструментом трансформации нерентабельных проектов в рентабельные, что в итоге стимулирует внедрение инновационных технологий ПНП и ИДН, разработку ТриЗН и позволит получить дополнительные доходы бюджета и увеличить рентабельный КИН залежей.





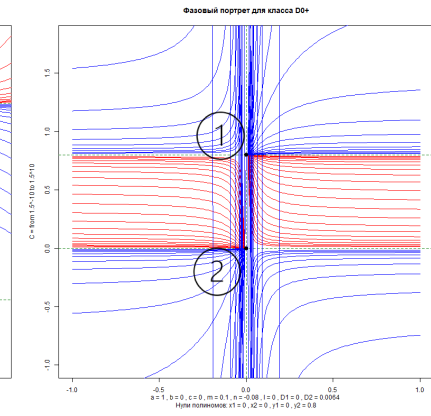
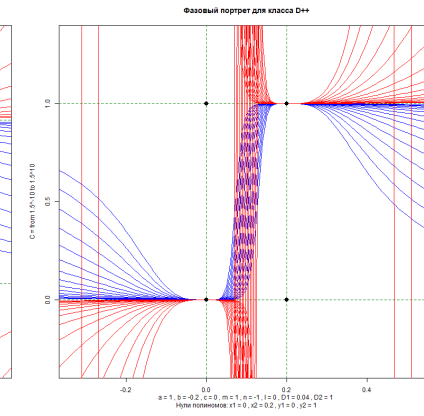
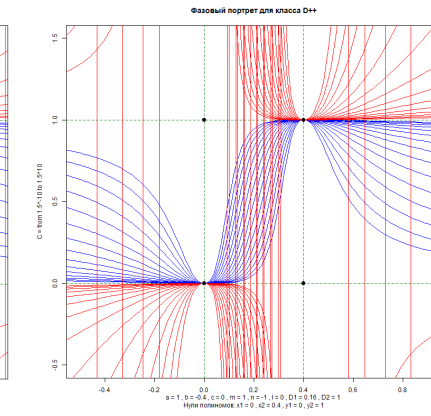
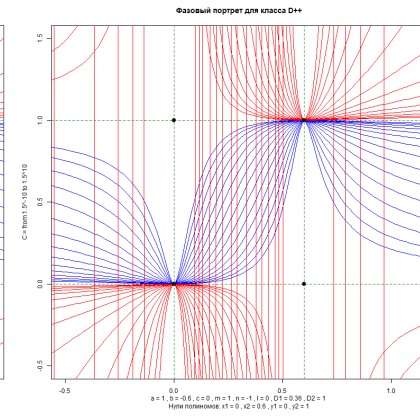
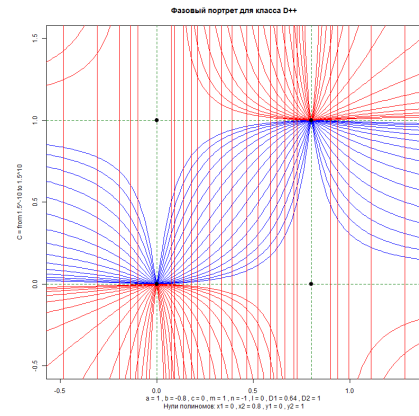
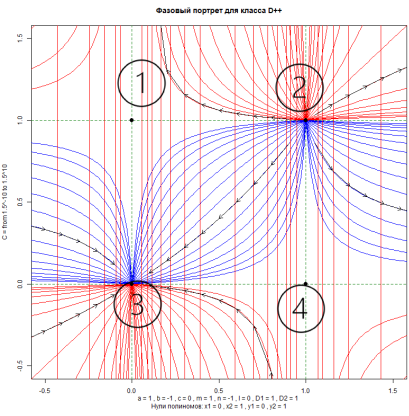
Спасибо за внимание!

# Продвижение струйного фронта вытеснения в модели пласта при вытеснении масла водой



БАРЫШНИКОВ Николай Александрович. ДВУХФАЗНЫЕ СТРУЙНЫЕ ТЕЧЕНИЯ В ПОРИСТЫХ СРЕДАХ  
ДИССЕРТАЦИЯ на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. 2014 г.

# $D^{++} \rightarrow D^{0+}$



# $D^{0+} \rightarrow D^{-+}$

