

DOI: <https://doi.org/10.25689/NP.2023.2.183-190>

EDN QUBITA

УДК 622.276.654

**Процессы внутрипластового горения при закачке воздуха  
в осложнённые наличием водонасыщенных пропластков  
залежи нефти**

*Низаев Р.Х., Бакиров И.М., Александров Г.В.*

*Институт «ТатНИПИнефть» ПАО «Татнефть», Бугульма, Россия*

**In-site combustion processes during air injection in oil reservoirs  
with water-saturated interlayers**

*R.Kh. Nizaev, I.M. Bakirov, G.V. Aleksandrov*

*TatNIPIneft Institute, PJSC TATNEFT, Bugulma, Russia*

**E-mail: [nizaev@tatnipi.ru](mailto:nizaev@tatnipi.ru)**

**Аннотация.** В работе приведены результаты расчетов, полученные с применением термогидродинамического моделирования при закачке воздуха в залежи, содержащие свободную пластовую воду. Представлены показатели накопленной добычи воды в случае закачки воздуха в залежи нефти с различными значениями начальной нефтенасыщенности. Вычислительный эксперимент при закачке большего объема воздуха в пласт, вытеснившего пластовую воду, приводит к тому, что в реакцию с пластовой нефтью вступает большее количество кислорода — увеличивается концентрация кислорода воздуха в зоне реакции. При этом увеличивается скорость протекания реакции взаимодействия кислорода с углеводородами пластовой нефти, процесс низкотемпературного окисления идет более интенсивно. В статье представлено изменение температуры в окрестности нагнетательной скважины при закачке воздуха в залежи пермской системы и терригенные залежи каменноугольной и девонской систем при различных значениях начальной нефтенасыщенности пласта. Обоснован критерий роста пластовой температуры до температуры самовоспламенения с самого начала закачки воздуха в залежи, содержащие свободную пластовую воду.

**Ключевые слова:** *внутрипластовое горение, темп закачки воздуха, высоковязкая нефть, сверхвязкая нефть, термогидродинамическое моделирование, процесс низкотемпературного окисления, интенсивный рост пластовой температуры, температура самовоспламенения*

**Для цитирования:** Низаев Р.Х., И.М. Бакиров, Г.В. Александров Процессы внутрипластового горения при закачке воздуха в осложнённые наличием водонасыщенных пропластков залежи нефти // Нефтяная провинция.-2023.-№2(34).-С. 183-190. - DOI <https://doi.org/10.25689/NP.2023.2.183-190>. - EDN QUBITA

**Abstract.** The paper presents the results of thermal reservoir simulation modeling of air injection into reservoirs containing free formation water. Cumulative water production profiles at different initial oil saturations are presented. Simulations of larger air injection volumes to displace formation water result in oxygen concentration increase in the reaction zone to cause more oxygen to contact with oil in situ. The reaction rate between oxygen and hydrocarbons increases to boost low-temperature oxidation process. The paper describes temperature changes in the vicinity of injection well during air injection in Permian sediments and terrigenous sediments of the Carboniferous and Devonian at different initial oil saturations. Criterion of formation temperature increase up to self-ignition temperature right at the beginning of air injection into reservoirs containing free water is substantiated.

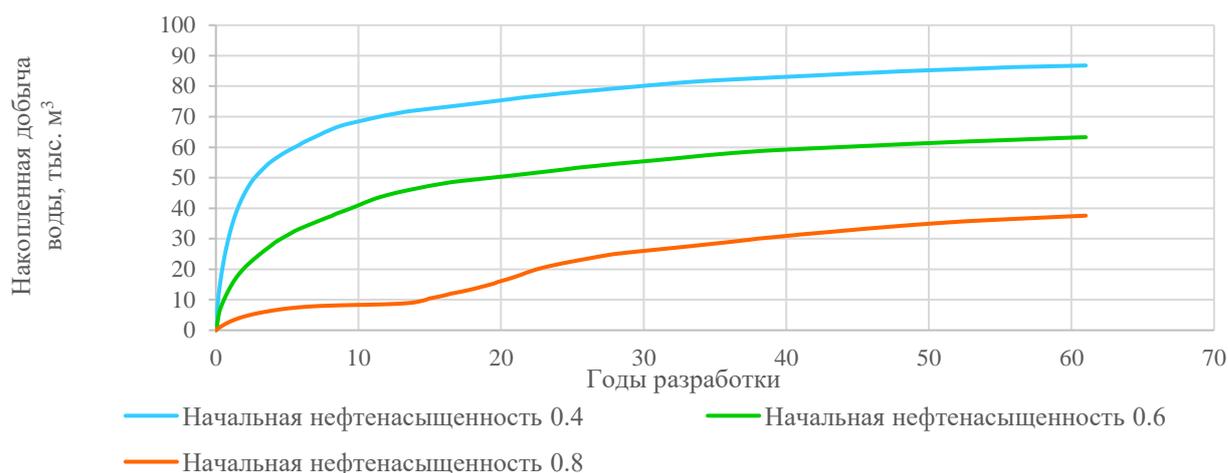
**Keywords:** *in-situ combustion, air injection rate, high-viscosity oil, extra-viscous oil, thermal reservoir simulation modeling, low-temperature oxidation process, rapid increase of reservoir temperature, self-ignition point*

**For citation:** R.Kh. Nizaev, I.M. Bakirov, G.V. Aleksandrov Protsessy vnutriplastovogo goreniya pri zakachke vozdukh v oslozhnonnyye nalichiyem vodonasyshchennykh proplastkov zalezhi nefti [In-site combustion processes during air injection in oil reservoirs with water-saturated interlayers]. Neftyanaya Provintsiya, No. 2(34), 2023. pp. 183-190. DOI <https://doi.org/10.25689/NP.2023.2.183-190>. EDN QUBITA (in Russian)

Одним из эффективных по выработке запасов нефти методов разработки залежей высоковязкой нефти, относящимся к тепловым методам разработки, является внутрипластовое горение, инициируемое с помощью закачки воздуха. Однако, в силу сложности химических и термодинамических процессов в залежи, происходящих при инициировании внутрипластового горения путём закачки в залежь воздуха, необходимо предварительное изучение этих процессов с помощью лабораторных экспериментов. Лабораторные эксперименты здесь могут быть проведены с помощью цифровых фильтрационных моделей [1,2].

Существенным отличием метода инициирования внутрипластового горения от других тепловых методов разработки залежей высовязкой нефти (ВВН) и сверхвязкой нефти (СВН) является достижение в пласте высоких значений температуры, что приводит к более высоким значениям доли порового объёма пласта, охваченного тепловым воздействием, и, соответственно, достигаются более высокие значения коэффициента нефтеизвлечения (КИН) залежи высоковязкой и сверхвязкой нефти. Следовательно, можно заключить, что проблема развития технологий разработки залежей ВВН и СВН тепловыми методами на основе термогидродинамического моделирования с целью повышения эффективности разработки является актуальной [3,4,5].

Показатели накопленной добычи воды с помощью добывающих скважин в сценарии закачки воздуха в залежи нефти с различными значениями начальной нефтенасыщенности приведены на рисунке 1, из которого видно, что с увеличением начальной нефтенасыщенности пласта объёмы добытой пластовой воды уменьшаются. Наличие большего объёма закачанного воздуха, вытеснившего пластовую воду, приводит к тому, что при прочих равных условиях в реакцию с пластовой нефтью вступает большее количество кислорода — увеличивается концентрация кислорода воздуха в зоне реакции, и, соответственно, увеличивается скорость протекания реакции взаимодействия кислорода с углеводородами пластовой нефти и, следовательно, процесс низкотемпературного окисления идёт более интенсивно.

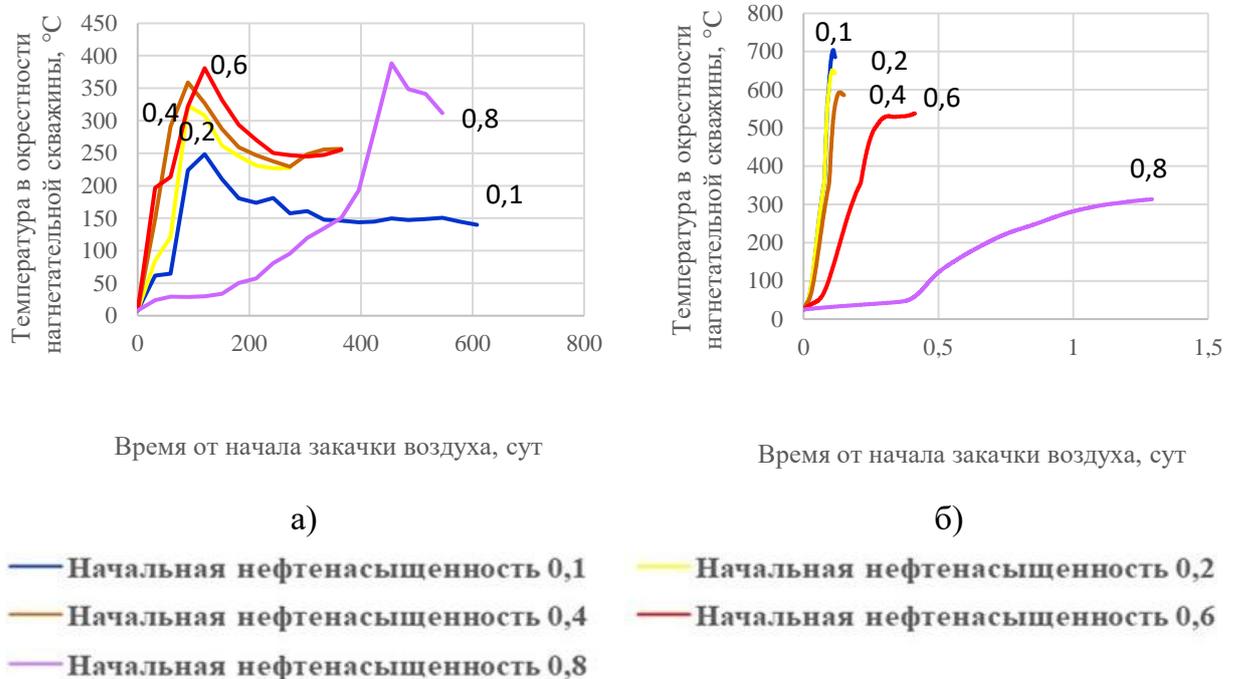


**Рис. 1. Показатели накопленной добычи воды при закачке воздуха в залежи нефти с различными значениями начальной нефтенасыщенности**

Как показали проведённые расчёты, время от начала закачки воздуха до момента установления фронта горения в залежах нефти, содержащих свободную воду в пласте, меньше в 3-4 раза, в отличие от случая закачки воздуха в аналогичные залежи, не содержащие свободную воду в пласте. Это явление позволяет с целью повышения степени выработки запасов нефти нефтеносных объектов, находящихся на поздней стадии разработки и характеризующихся высокой степенью обводнённости добываемой продукции и значительной неснижаемой нефтенасыщенностью, рекомендовать организацию закачки воздуха в пласт, обеспечивающей вытеснение свободной пластовой воды к стволам добывающих скважин, интенсивный рост температуры в пласте в процессе инициирования низкотемпературного окисления.

На рис. 2 приведён график изменения температуры в окрестности нагнетательной скважины при закачке воздуха в залежи пермской системы (а), и залежи, приуроченные к терригенным отложениям каменноугольной и девонской систем (б) с различными значениями начальной нефтенасыщенности пласта. Как видно из этого графика, интенсивный рост температуры в окрестности нагнетательной скважины наблюдается с самого начала

закачки воздуха в залежи нефти пермской системы с начальной нефтенасыщенностью 0,2–0,6, а также в залежи нефти каменноугольной и девонской систем с начальной нефтенасыщенностью от 0,1 до 0,8.



**Рис. 2. Динамика температуры в окрестности нагнетательной скважины при закачке воздуха в залежи пермской системы (а) и терригенные залежи каменноугольной и девонской систем (б) при различных значениях начальной нефтенасыщенности пласта**

Увеличение времени от начала закачки воздуха до начала интенсивного роста среднепластовой температуры с увеличением вязкости нефти в начальных пластовых условиях при закачке воздуха в залежи нефти пермской системы с начальной нефтенасыщенностью 0,8 обусловлено тем, что с началом закачки воздуха в залежь нефти часть энергии, которая выделяется в результате химического взаимодействия кислорода с пластовой нефтью, затрачивается на протекание эндотермической реакции крекинга сверхвязкой нефти.

На тех нефтеносных залежах, на которых с началом закачки воздуха в пласт наблюдается интенсивный рост среднепластовой температуры, отсут-

ствует необходимость применения технологий организации принудительного роста пластовой температуры (горюче-окислительной смеси (ГОС), электропрогрева, розжига пласта с помощью газовой горелки и т. д.) при их разработке с помощью внутрипластового горения, инициируемого закачкой воздуха.

### **Вывод**

Обоснован критерий роста пластовой температуры до температуры самовоспламенения с самого начала закачки воздуха в залежи, содержащие свободную пластовую воду. Иницируемый процесс низкотемпературного окисления сопровождается интенсивным ростом пластовой температуры до температуры самовоспламенения с самого начала закачки воздуха в осложнённые наличием водонасыщенных пропластков залежи нефти:

- приуроченные к отложениям пермской системы с начальной нефтенасыщенностью в пределах 0,2–0,6;
- приуроченные к терригенным отложениям каменноугольной и девонской систем с начальной нефтенасыщенностью в пределах 0,1–0,8.

### **Список литературы**

1. Низаев, Р.Х. Исследование характера протекания процессов фильтрации в залежах высоковязкой и сверхвязкой нефти при закачке нефти с помощью гидродинамического моделирования /Р.Х. Низаев, Г.В. Александров, Ю.Л. Егорова// Нефтяная провинция [Электронный ресурс] : сетевое научное издание /Общественная организация "Волго-Камское региональное отделение Российской академии естественных наук", Секция нефти и газа – 2020 – № 1(21), С. 109-124. Режим доступа к журн.: <http://www.vkro-raen.com>.
2. Совершенствование технологий разработки месторождений высоковязкой нефти при тепловом воздействии [Текст]/Р.С. Хисамов, Р.Х. Низаев, Г.В. Александров, Ю.Л. Егорова, Р.Х. Исмагилов - Казань: Ихлас, 2020 – 160 с.
3. Антониади. Д.Г. Настольная книга по термическим методам добычи нефти [Текст]/Д.Г. Антониади, А.Р. Гарушев, В.Г. Ишханов – Краснодар : Советская Кубань, 2000 – 464с.
4. Байбаков. Н.К. Тепловые методы разработки нефтяных месторождений [Текст]/Н.К. Байбаков, А.Р. Гарушев – М.: Недра, 1977. – 238 с.

5. Низаев, Р.Х. Исследование характера протекания внутрипластовых процессов при закачке воздуха в залежи высоковязкой нефти с различными геолого-физическими характеристиками и физико-химическими свойствами пластовой нефти с помощью гидродинамического моделирования [Презентация] /Р.Х. Низаев, Г.В. Александров, Ю.Л. Егорова// Материалы Технической конференции SPE «Третичные методы увеличения нефтеотдачи пластов» (Москва, 20-21 февраля 2018г.) [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://rca.spe.org/ru/events/spe-workshop-enhanced-oil-recovery/proceedings>

### References

1. Nizaev R.Kh., Aleksandrov G.V., Egorova Yu.L. Reservoir simulation models used to study fluid filtration processes in heavy and extra-heavy oil fields developed by air injection. Neftyanaya Provintsiya [Oil Province]. 2020, No. 1(21), pp. 109-124. Available at: <http://www.vkro-raen.com>. (in Russian)
2. Khisamov R.S., Nizaev R.Kh., Aleksandrov G.V., Egorova Yu.L., Ismagilov R.Kh. Sovershenstvovanie tekhnologiy razrabotki mestorozhdeniy vysokovязkoy nefti pri teplovom vozdeystvii [Improvement of extra-viscous oil thermal recovery technologies]. Kazan: Ikhlas Publ. 2020. 160 P. (in Russian)
3. Antoniadi D.G., Garushev A.R., Ishkhanov V.G. Nastol'naya kniga po termicheskim metodam dobychi nefti [Handbook on thermal oil recovery methods]. Krasnodar: Sovetskaya Kuban Publ. 2000. 464 P. (in Russian)
4. Baybakov N.K, Garushev A.R. Teplovye metody razrabotki neftyanых mestorozhdeniy [Thermal oil recovery methods]. Moscow: Nedra Publ. 1977. 238 P. (in Russian)
5. Nizaev R.Kh., Aleksandrov G.V., Egorova Yu.L. Issledovanie kharaktera protekaniya vnutriplastovykh protsessov pri zakachke vozdukha v zalezhi vysokovязkoy nefti s razlichnymi geologo fizicheskimi kharakteristikami i fiziko khimicheskimi svoystvami plastovoy nefti s pomoshch'yu gidrodinamicheskogo modelirovaniya [Study of the nature of in-situ processes during air injection into high-viscosity oil reservoirs with different geological and physical characteristics and physical and chemical properties of reservoir oil by means of reservoir simulation modeling]. Proceedings of SPE Technical Conference Tertiary Enhanced Oil Recovery Methods, Moscow 20-21 February 2018. Available at <http://rca.spe.org/ru/events/spe-workshop-enhanced-oil-recovery/proceedings>. (in Russian)

### Сведения об авторах

*Низаев Рамиль Хабутдинович*, доктор технических наук, профессор кафедры разработки и эксплуатации нефтяных и газовых месторождений, Альметьевский государственный нефтяной институт

Россия, 423462, Альметьевск, ул. Ленина, 2

Ведущий научный сотрудник, институт "ТатНИПИнефть" ПАО "Татнефть" им. В.Д. Шашина

Россия, 423236, Бугульма, ул. Джалиля, 40

E-mail: [nizaev@tatnipi.ru](mailto:nizaev@tatnipi.ru)

*Бакиров Ильшат Мухаметович*, доктор технических наук, главный научный сотрудник отдела разработки нефтяных месторождений, институт "ТатНИПИнефть" ПАО "Татнефть" им. В.Д. Шашина

Россия, 423236, г. Бугульма, ул. М. Джалиля, дом 32

E-mail: [Bakirov@tatnipi.ru](mailto:Bakirov@tatnipi.ru)

*Александров Георгий Владимирович*, младший научный сотрудник лаборатории геологического и гидродинамического моделирования отдела разработки нефтяных месторождений, институт "ТатНИПИнефть" ПАО "Татнефть" им. В.Д. Шашина  
Россия, 423236, г. Бугульма, ул. М. Джалиля, дом 32  
E-mail: razrcmg@tatnipi.ru

### **Authors**

*R.Kh. Nizaev*, Dr.Sc., Professor, Oil and Gas Fields Development and Operation Chair, Almeteyevsk State Oil Institute  
2, Lenin st., Almeteyevsk, 423462, Russian Federation  
Leading Research Associate, TatNIPIneft Institute-PJSC TATNEFT  
40, M. Djalil st., Bugulma, 423236, Russian Federation  
E-mail: nizaev@tatnipi.ru

*I.M. Bakirov*, Dr.Sc., Professor, Chief Research Associate, Reservoir Engineering Department, TatNIPIneft Institute-PJSC TATNEFT  
32, M. Djalil st., Bugulma, 423236, Russian Federation  
E-mail: Bakirov@tatnipi.ru

*G.V. Aleksandrov*, Junior Research Associate, Geological and Reservoir Simulation Modeling Laboratory, Reservoir Engineering Department, TatNIPIneft Institute-PJSC TATNEFT  
32, M. Djalil st., Bugulma, 423236, Russian Federation  
E-mail: razrcmg@tatnipi.ru

*Статья поступила в редакцию 08.06.2023*  
*Принята к публикации 15.06.2023*  
*Опубликована 30.06.2023*