

УДК 004.942

СИСТЕМНО-ДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ИСТОЩЕНИЯ ЗАПАСОВ НЕФТЯНЫХ ПОЛЕЙ

Киндинова В.В., Кузнецова Е.В. (Москва)

1. Введение

Методы имитационного моделирования предполагают разработку программных моделей реальных систем или процессов, выполнение этих программ на ЭВМ и изучение поведения моделей с помощью компьютерных экспериментов. Важнейшее свойство имитационной модели – нахождение ее на границе возможностей математического моделирования, когда имитационное моделирование – единственный способ получить представление о поведении сложной системы.

Системно-динамический подход имитационного моделирования предполагает моделирование сложных систем на высшем уровне абстракции, когда исследователь абстрагируется от отдельных объектов системы и рассматривает только агрегированные количественные характеристики потоков таких объектов и взаимозависимость этих потоков. Системная динамика – один из самых популярных инструментов, используемых в настоящее время для анализа и проектирования сложных систем. Она используется для моделирования макроэкономических и социальных процессов, для исследования климата и прогнозирования погоды, для управления ресурсами и исследования распространения болезней и т. д. [1]

Метод системной динамики был предложен профессором Массачусетского технологического института (MIT) Дж.В. Форрестером в 1961 году [2]. В процессе разработки метода Дж.В. Форрестер применил принципы изучения информационной обратной связи, существующие в сервомеханизмах, для изучения динамики сложных производственных и социальных систем. Он выделил главные особенности таких систем: динамику (изменение во времени), петли обратной связи, задержки, нелинейность и переменчивость причин сложного поведения. Построение моделей системной динамики сводится к построению графической диаграммы причинных связей и глобальных влияний одних параметров на другие параметры во времени. Далее на основе этих диаграмм создается математическая модель, которая в свою очередь имитируется на компьютере с использованием численных методов.

Процесс создания системно-динамической имитационной модели включает в себя ряд основных этапов, таких как:

- Содержательное описание объекта моделирования;
- Построение концептуальной схемы взаимодействия базовых структур модели;
- Выявление основных понятий и построение схемы петель причинно-следственных связей;
- Построение технологической схемы и схемы хранения;
- Разработка интерфейса моделирования и планирование экспериментов.

Однако формальное следование перечисленным шагам не всегда приводит к появлению действительно полезных моделей. По мнению идеологов системной динамики [1; 3; 4; 5], успех метода системной динамики определяет:

- Системный подход к проблеме, глубокое понимание сущности системы, ее границ и движущих сил;
- Непосредственное структурирование системно-динамической модели;
- Проведение вычислительных экспериментов на модели.

Основная цель данной работы – системно-динамическое моделирование истощения запасов нефтяных полей, а именно, – исследование динамики количества действующих скважин, их производительности на фоне падения запасов нефтяного поля.

Применение метода системной динамики для имитации деятельности нефтяной компании в условиях истощения запасов нефтяных полей объясняется следующим:

- Системно-динамическое моделирование применимо для концептуализации и структуризации проблем. В модели изучаются процессы введения в эксплуатацию и консервации нефтяных скважин с учетом их производительности и размера месторождения. Понимание этих процессов определяет понимание и выбор сценариев управления процессами.

- Выбор факторов, подлежащих включению в модель, обусловлен вопросами, на которые требуется дать ответ с помощью модели. Подход системной динамики позволяет включать в модель большое количество факторов различной природы, без труда вводить в модель новые понятия и связи, менять набор доминантных факторов в процессе исследования при сравнительно небольшой вычислительной сложности.

- С помощью метода системной динамики можно успешно ставить опыты с системами, выбирать альтернативы, проигрывать множества сценариев типа «что-если», решать текущие задачи без перенесения ситуации в режим реального времени, поскольку экспериментирование с исчезающим ресурсом – нефтью – затруднено.

В статье предлагается подробное описание построения системно-динамической модели, позволяющее создать полезную обучающую модель в соответствии с описанными выше этапами метода системной динамики. Дополнительно решаются следующие задачи:

- Сбор и анализ исходных данных предметной области. Границы модели и состав эндогенных и экзогенных переменных;
- Допущения, сделанные при построении модели;
- Функциональные зависимости параметров;
- Оценка адекватности построенной имитационной модели;
- Тестирование и исследование свойств имитационной модели.

2. Имитационное моделирование динамики истощения запасов нефтяных полей

Процессы истощения протекают под воздействием ряда позитивных и негативных факторов, которые могут существенно повлиять на результаты стратегического планирования и управления нефтяной отрасли. Так, истощение запасов наблюдается по мере ввода в строй всё большего количества скважин, но истощение приводит также к закрытию и консервации скважин уже действующих. Истощение запасов негативно воздействует и на производительность самих скважин. Согласно использованию простейшей и мало затратной технологии нефтедобычи, нефтяной насос работает лишь благодаря разнице давлений между дном скважины и секцией подпочвы. Разница давлений со временем уменьшается. При истощении нефтяного поля до 75% объема разница давлений стремится к окончательному выравниванию и деградации, нефтедобыча с использованием мало затратной технологии становится невозможной, и дальнейшая эксплуатация нефтяного поля связывается с внедрением уже весьма дорогостоящих технологических решений.

Для исследования процесса истощения нефтяных полей под воздействием указанных выше факторов разработана имитационная модель с использованием системно-динамического подхода.

При построении рассматривались основные концепты процессов, такие как НЕФТЯНЫЕ ЗАПАСЫ, СКВАЖИНЫ и их ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ, а также их взаимовлияние (рис. 1)

ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ → СКВАЖИНЫ (отображает предрасположенность к уменьшению числа вводимых скважин под воздействием увеличения их производительности);

ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ → НЕФТЯНЫЕ_ЗАПАСЫ (отображает предрасположенность к истощению нефтяных запасов под воздействием увеличения производительности скважин);

СКВАЖИНЫ → НЕФТЯНЫЕ_ЗАПАСЫ (отображает предрасположенность к истощению нефтяных запасов под воздействием увеличения числа скважин);

НЕФТЯНЫЕ_ЗАПАСЫ → ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ (отображает технологическую предрасположенность к уменьшению производительности скважин под воздействием истощения нефтяных запасов);

НЕФТЯНЫЕ_ЗАПАСЫ → СКВАЖИНЫ (отображает предрасположенность к уменьшению числа вводимых скважин под воздействием истощения нефтяных запасов).

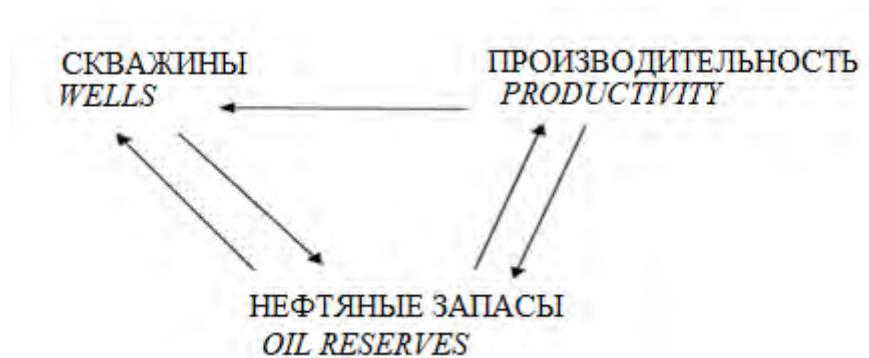


Рис.1. Концептуальная схема взаимодействий базовых структур модели

Качественное описание процесса дает причинно-следственная диаграмма. Определяющие понятия и правила построения данной диаграммы описаны в учебном пособии Д.Ю. Каталевского [6]. Причинно-следственная диаграмма модели динамики истощения нефтяных полей определяет процесс следующим образом.

- Как процесс, состоящий из множества переменных, взаимодействующих друг с другом посредством петель обратной связи, которые в свою очередь могут взаимодействовать между собой.

- Как процесс, протекающий в определенных границах.

- Как процесс, в котором определены «точки приложения», где можно вмешаться в процесс и изменить поведение системы.

На этом этапе определены границы модели и набор факторов, включенных в модель.

При моделировании использовались следующие допущения:

- Разработка месторождения осуществляется по малозатратной технологии, описанной выше;

- Разработка прекращается при истощении нефтяного поля до 75% объема;

- Введены следующие функциональные зависимости, основанные на экспертных оценках:

- функция влияния на продуктивность скважины,
- функция влияния на ввод в эксплуатацию скважин,
- функция влияния на консервацию скважин.

Причинно-следственная диаграмма, представленная на рис.2.

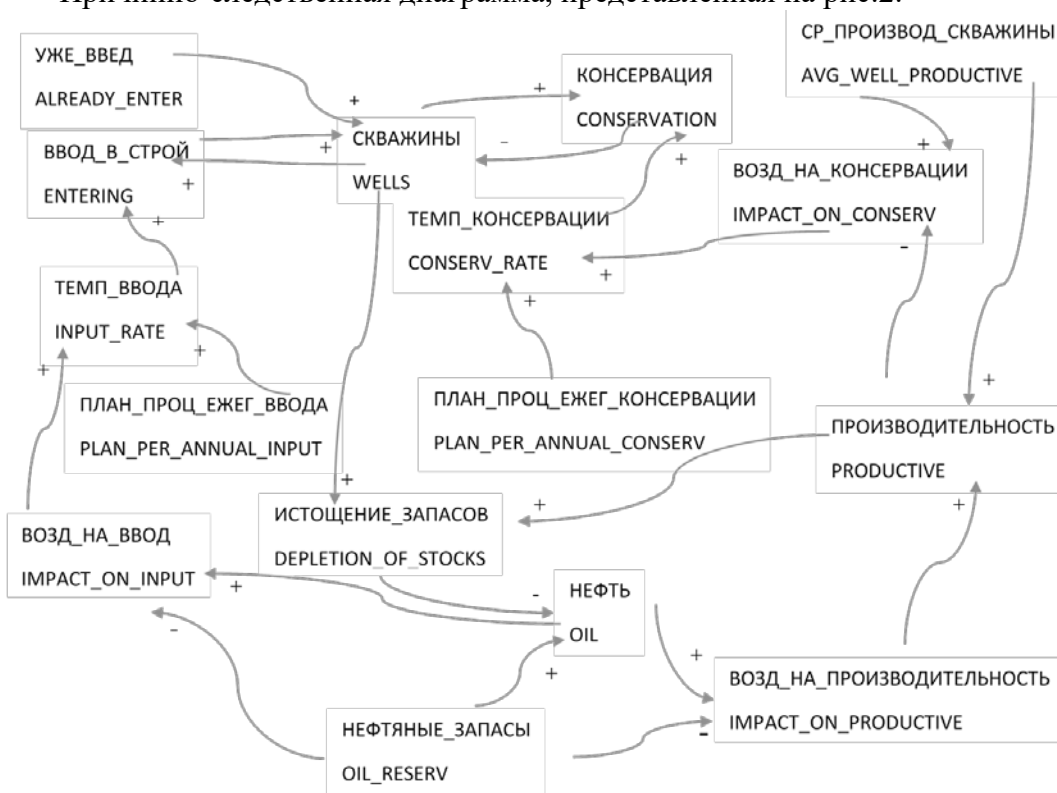


Рис.2. Причинно-следственная диаграмма.

Причинно-следственная диаграмма является основой построения системно-динамической имитационной модели, представляющей собой потоковую диаграмму. Графическая нотация построения потоковых диаграмм реализована в различных специализированных системно-динамических коммерческих программных пакетах, таких как IThink, Powersim и др. [7]. Реализована она также и в многопрофильном пакете имитационного моделирования AnyLogic [8]. Пакет AnyLogic разработан российской компанией XJTechnology [8]. Помимо системной динамики пакет поддерживает дискретно-событийный и агентный подходы имитационного моделирования, а также позволяет строить гибридные модели. При построении гибридных моделей применяется сразу нескольких подходов имитационного моделирования.

На основе причинно-следственной диаграммы построена потоковая диаграмма модели (рис. 3), с использованием системно-динамических инструментов системы AnyLogic.

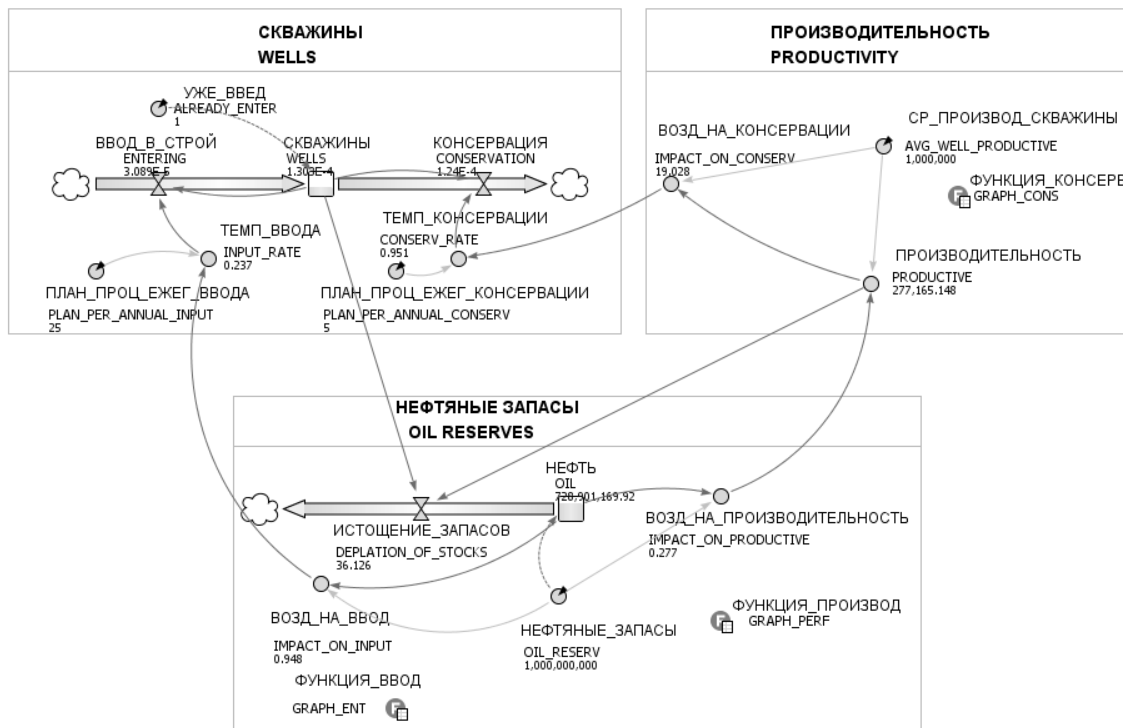
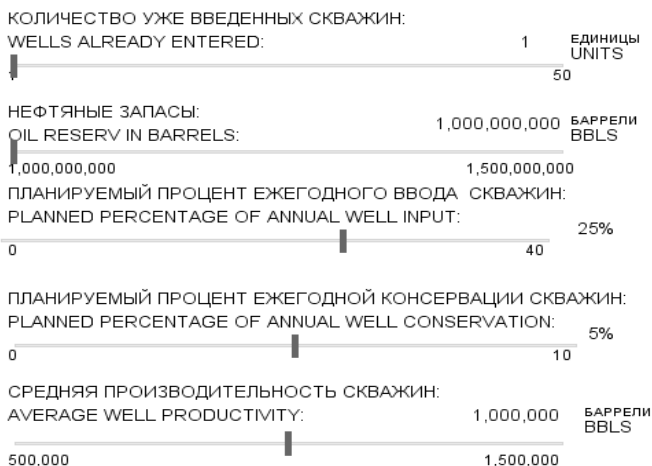


Рис. 3. Поточковая диаграмма процесса истощения нефтяных полей

Интерфейсная панель, позволяющая задавать значения параметров для проведения компьютерных экспериментов, представлена на рис. 4. В модели пять параметров управления: `ALREADY_ENTER`, `OIL_RESERV`, `PLAN_PER_ANNUAL_INPUT`, `PLAN_PER_ANNUAL_CONSERV`, `AVG_WELL_PRODUCTIV`. `ALREADY_ENTER` – количество уже работающих скважин. Параметр может принимать значение от 1 до 50 единиц. `OIL_RESERV` – нефтяные запасы. Параметр может принимать значения от 1,000,000,000 до 1,500,000,000 баррелей. `PLAN_PER_ANNUAL_INPUT` – планируемый процент ежегодного ввода скважин. Параметр может принимать значения от 0 до 40 %. `PLAN_PER_ANNUAL_CONSERV` – планируемый процент ежегодной консервации скважин. Параметр может принимать значение от 0 до 5 %. `AVG_WELL_PRODUCTIV` – количество нефти, которую скважина добывает за год, пока нефть по технологии 25% доступна. Параметр может принимать значения от 500,000 до 1,500,000 баррелей. Для установки значений параметров модели пользователю предлагается воспользоваться элементами управления в виде слайдеров, см. рис. 4. На рисунке 4 установлены следующие значения управляемых параметров: `ALREADY_ENTER`=1 единица, `OIL_RESERV`=1,000,000,000 баррели, `PLAN_PER_ANNUAL_INPUT`=25%, `PLAN_PER_ANNUAL_CONSERV`=5%, `AVG_WELL_PRODUCTIV`=1000,000 баррели.

МОДЕЛЬ ИСТОЩЕНИЯ НЕФТЯНЫХ ЗАПАСОВ MODEL DEPLETION OF OIL RESERVES

ПАРАМЕТРЫ ЭКСПЕРИМЕНТА: EXPERIMENT PARAMETERS:



ЗАПУСК МОДЕЛИ И ДЕМОНСТРАЦИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

RUN MODEL AND OPEN PRESENTATION OF THE EXPERIMENT

Рис. 4 . Интерфейс для задания параметров модели.

На рисунке 5 приведен один из пользовательских интерфейсов. Интерфейс разработан с целью представления результатов моделирования в наглядной графической форме, пригодной для анализа данных. Модельное время исчисляется годами. Временной период моделирования 40 лет.

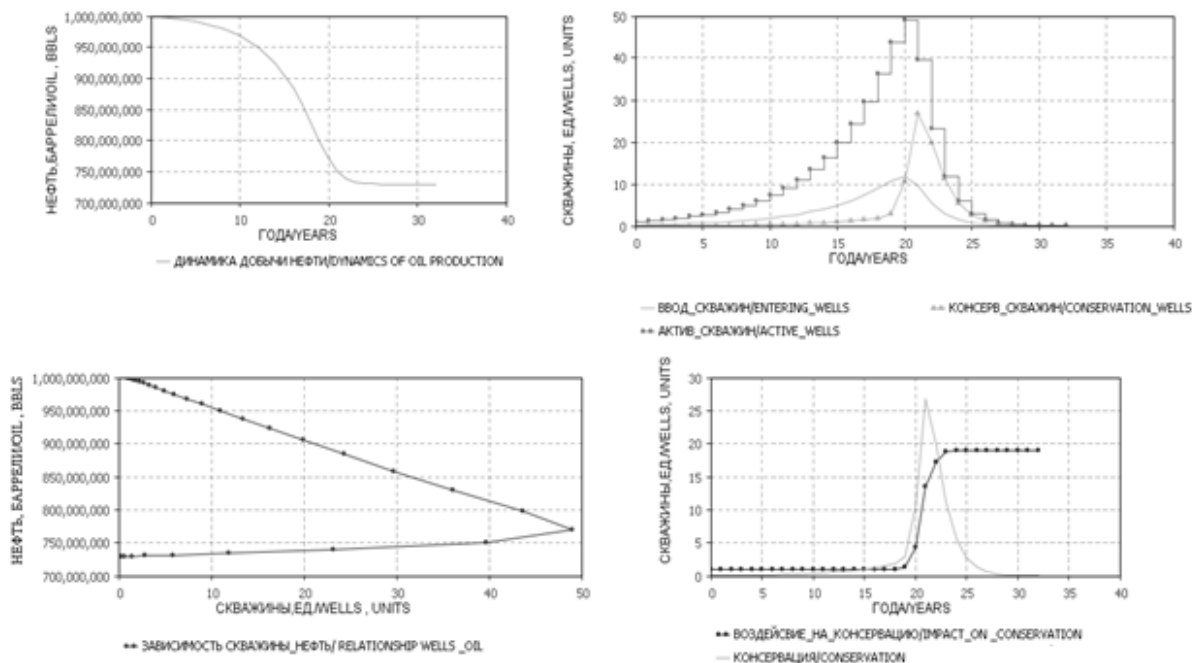


Рис. 5. Интерфейс модели для анализа данных, значения параметров эксперимента:

ALREADY_ENTER= 1 скважина, OIL_RESERV=1,000,000,000 баррели,
PLAN_PER_ANNUAL_INPUT=25%, PLAN_PER_ANNUAL_CONSERV=5 %,
AVG_WELL_PRODUCTIV=1,000,000 баррели.

Исследованию проблемы оценки адекватности имитационной модели и точности полученных с ее помощью результатов уделяли и уделяют много внимания ученые и специалисты в области имитационного моделирования [9; 10]. Только модель, адекватно описывающая объект или явление, способна правильно предсказывать его поведение в будущем. Проверка адекватности построенной модели осуществлялась с использованием следующих соображений:

- Изменение шага интегрирования (поведение модели не зависит от выбора шага интегрирования)
- Демонстрация реалистичных типов поведения модели («Полезность модели, ее адекватность зависит не столько от того, реалистичны ли сценарии изменения ее движущих сил, сколько от того, реалистичны ли типы поведения, которые она демонстрирует» [6; 11]).

Имитационные эксперименты на модели позволили нам оценить срок службы месторождения в зависимости от планируемого процента ежегодного ввода скважин в эксплуатацию. Результаты приведены на рис. 6-7.

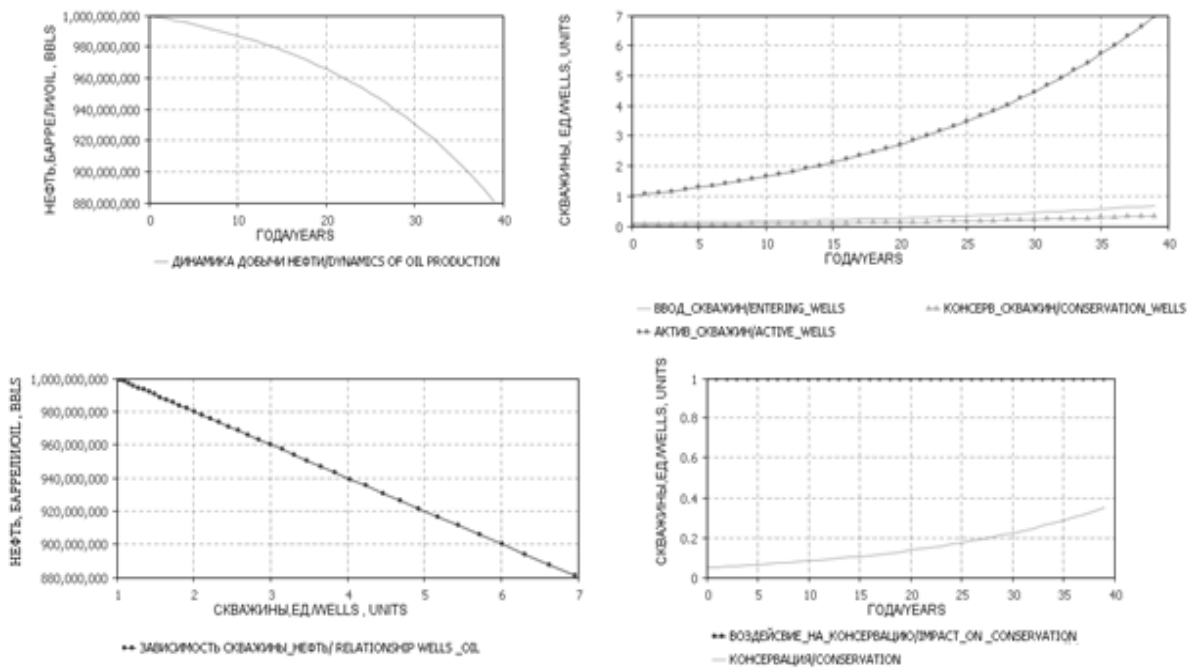


Рис.6. Динамика процессов при PLAN_PER_ANNUAL_INPUT =10%.

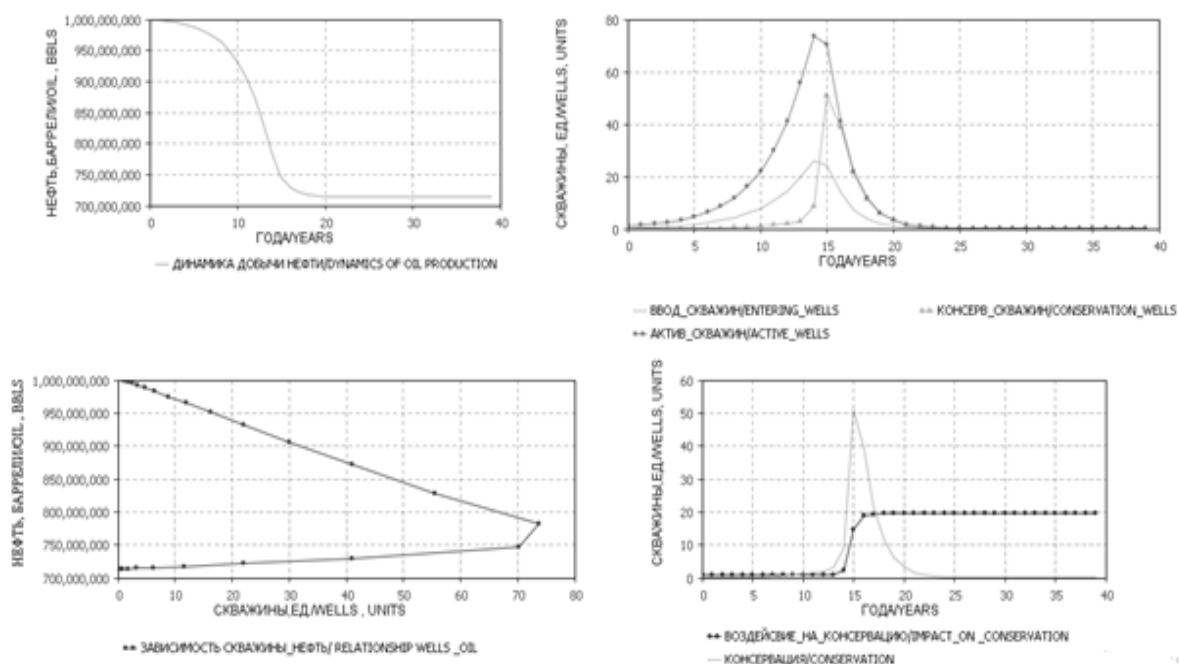


Рис.7. Динамика процессов при $PLAN_PER_ANNUAL_INPUT = 36\%$.

Проанализируем результаты имитационных экспериментов. Запасы нефти не возобновляются со временем и их можно израсходовать только раз. При $PLAN_PER_ANNUAL_INPUT = 36\%$ за период моделирования 40 лет наблюдается типовой вид поведения динамической системы. Такой вид поведения системы называют “рост и спад”. Наблюдается “рост и спад” количества действующих скважин на фоне падения запасов невозобновляемого ресурса нефти. Можно заметить, чем больше скважин вводится, тем меньше срок истощения месторождения нефти. В представленной модели не учитывается переменная “капитал” добывающей отрасли. Переменную “капитал” можно использовать для регулирования скорости добычи нефти.

3. Обсуждение

Предложенная авторами имитационная модель динамики истощения запасов нефтяных полей является дополнением к популярной модели Донеллы Медоуз «невозобновимый запас препятствует использованию возобновимого запаса» [11]. Центральным вопросом двух моделей является исследование противоречий между ростом объемов нефтедобычи и ограниченными условиями окружающей среды. Но в отличие от модели Донеллы Медоуз, предложенная модель акцентирует внимание на технологии нефтедобычи, рассматривает процесс истощения нефтяных запасов в зависимости от производительности и количества скважин нефтедобычи. Предложенная модель является симулятором процесса на высоком уровне абстракции с учетом ограничений метода системной динамики. Имитационные эксперименты с моделью позволяют проследивать поведение процесса во времени шаг за шагом, что способствует более глубокому пониманию самого процесса. Результаты не противоречат результатам гидродинамического моделирования нефтяных месторождений с использованием данных промысловых исследований и фактических замеров скважин [12].

4. Заключение

В работе показано, что метод системной динамики имитационного моделирования является популярным методом анализа и проектирования макроэкономических и социальных систем, применяется также для анализа процессов нефтегазовой отрасли. В работе проанализирован метод системной динамики как метод имитационного моделирования с математической точки зрения наиболее близкий аналитическому подходу [13], показаны его достоинства и ограничения.

В работе представлена разработанная авторами имитационная модель динамики истощения запасов нефтяных полей с использованием системно-динамического подхода в среде программного пакета AnyLogic. Представлены результаты имитационного исследования зависимости истощения запаса нефтяных полей от производительности скважин и их количества. Предложенная модель может быть использована для проверки чувствительности системы к начальным предположениям, а также для определения путей улучшения реальной системы. Проведенные исследования могут быть полезными для менеджмента нефтедобывающих компаний для экспресс-анализа процессов нефтедобычи.

Предложенная модель успешно применялась авторами для обучения имитационному моделированию студентов, специализирующихся в области вычислительной математики и программирования, института «Информационные технологии и прикладная математика» Московского авиационного института (исследовательского университета) [13]. Модель может быть использована при обучении студентов в нефтегазовой отрасли.

Литература

1. **Sterman J.D.** Business Dynamics: Systems Thinking and Modeling for a Complex World. – Irwin McGraw-Hill, Boston, 2000.
2. **Forrester J.W.** Industrial dynamics. – Productivity Press, Portland Oregon, 1961.
3. **Медоуз Д.** Азбука системного мышления / пер. с англ. под ред. Н.П. Тарасовой. – 2-ое изд. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2011. – 343 с.
4. **Meadows D.H., Meadows D.L., Randers J., Behrens W.W.** The limits to growth. – Universe Books, New York, 1972.
5. **Meadows D.H., Meadows D.L., Randers J.** Beyond the Limits. – Post Mills, VT: Chelsea Green Publishing Company, 1992
6. **Каталевский Д.Ю.** Основы имитационного моделирования и системного анализа в управлении: учебное пособие. – М.: Издательский дом «Дело» РАНХиГС, 2015. – 513 с.
7. **Карпов Ю.** Имитационное моделирование систем. Введение в моделирование с AnyLogic 5. – СПб.: БХВ-Петербург, 2006. – 400с.
8. The AnyLogic Company. The AnyLogic Company register. – 2001. <https://www.anylogic.com/>. Accessed 19 Jul 2001.
9. **Balci O.** (Verification, validation and accreditation. In: Proceedings of the Winter Simulation Conf. – Washington, 1998.
10. **Sargent RG.** Verification and validation of simulation models // Journal of Simulation. – 2013. – 7: 12–24. doi:10.1057/jos.2012.20.
11. **Meadows D.H.** Thinking in Systems. – Chelsea Green Publishing Company, Vermont, 2009.
12. **Гладков Е.А.** Геологическое и гидродинамическое моделирование месторождений нефти и газа: учебное пособие / Е.А. Гладков; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политех. университета, 2012. – 99 с.

13. **Киндинова В.В., Кринецкий Е.О., Кузнецова Е.В.** Системная динамика для студентов IT-специальностей // Десятая всероссийская научно-практическая конференция по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности «Имитационное моделирование. Теория и практика» (ИММОД-2021). Труды конференции (электронное издание), 20–22 октября 2021 г. – Санкт-Петербург: АО «ЦТСС», 2021. – 694 с. – С. 581-586. ISBN 978-5-905526-05-3.