

Научная статья

УДК 631.1

<https://agroconf.sgau.ru>

**Современные методы компьютерного моделирования процессов
детонации и их применение в промышленной
безопасности: от алгоритмов к практике**

А.А. Жиздюк, А.А. Курдюкова

Саратовский государственный университет генетики, биотехнологии
и инженерии имени Н.И. Вавилова, г. Саратов, Россия.

Аннотация. В статье подробно описаны физико-математические основы детонации, а также современные численные методы, используемые для её моделирования. Представленные технологии, такие как метод конечных элементов и метод гидродинамических расчётов, позволили достичь углубленного понимания процессов, связанных с детонацией. Подчеркнута важность использования программных инструментов, таких как ANSYS Autodyn и OpenFOAM, для создания точных моделей, которые помогают в прогнозировании рисков на производстве. Несмотря на значимые успехи в области моделирования детонации, работа сталкивается с вызовами, включая проблемы поддержки точных данных и доступа к вычислительным ресурсам. Перспективы развития данных методик связаны с использованием искусственного интеллекта, что обещает улучшить точность моделей и повысить уровень безопасности на производстве. Таким образом, интеграция современных методов моделирования является важным шагом к предотвращению аварий и улучшению охраны труда в промышленных системах.

Ключевые слова: современные методы, компьютерное моделирование, процессы детонации, промышленная безопасность, алгоритмы, практика, взрывчатые вещества, предсказание поведения, физико-химические процессы, численное интегрирование, методы конечных элементов, механизмы взрыва, последствия взрыва, эффективные решения, предотвращение аварий, минимизация рисков.

Для цитирования: Жиздюк А.А., Курдюкова А.А. Современные методы компьютерного моделирования процессов детонации и их применение в промышленной безопасности: от алгоритмов к практике // Аграрные конференции. 2026. № 4(58). С. 12-25. <http://agroconf.sgau.ru>

Modern methods of computer simulation of detonation processes and their application in industrial safety: from algorithms to practice**A.A. Zhizdyuk, A.A. Kurdyukova**Saratov State University of genetics, biotechnology and engineering
named after N.I. Vavilov, Saratov, Russia

Abstract. The article describes in detail the physical and mathematical foundations of detonation, as well as modern numerical methods used for its modeling. The presented technologies, such as the finite element method and the hydrodynamic calculation method, have made it possible to achieve an in-depth understanding of the processes associated with detonation. The importance of using software tools such as ANSYS Autodyn and OpenFOAM to create accurate models that help predict risks in production is emphasized. Despite significant advances in detonation modeling, the work faces challenges, including the challenges of maintaining accurate data and accessing computing resources. The prospects for the development of these techniques are related to the use of artificial intelligence, which promises to improve the accuracy of models and increase the level of safety in production. Thus, the integration of modern modeling methods is an important step towards preventing accidents and improving occupational safety in industrial systems.

Keywords: modern methods, computer modeling, detonation processes, industrial safety, algorithms, practice, explosives, behavior prediction, physico-chemical processes, numerical integration, finite element methods, explosion mechanisms, explosion consequences, effective solutions, accident prevention, risk minimization

For citation: Zhizdyuk A.A., Kurdyukova A.A. Modern methods of computer simulation of detonation processes and their application in industrial safety: from algorithms to practice // Agrarian Conferences, 2026; (4(58)): 12-25 (InRuss.). <http://agroconf.sgau.ru>

Введение. Актуальность данной статьи заключается в том, что в последние десятилетия компьютерное моделирование [7-8] стало неотъемлемой частью многих научных и инженерных дисциплин, а особенно в области изучения процессов детонации, где точное предсказание поведения взрывчатых веществ имеет критическое значение для обеспечения промышленной безопасности.

Целью статьи является рассмотрение основных современных алгоритмов компьютерного моделирования, их преимущества и недостатки, а также примеры успешного внедрения в практику; анализ того, как эти технологии помогают не только в теоретических исследованиях, но и в реальных условиях

на промышленных объектах, обеспечивая безопасность работников и защиту окружающей среды от потенциально опасных ситуаций.

Методика исследований. Изучение научно-методической литературы [1-8] по исследуемой проблеме, анализ и обобщение материала, полученного в результате наблюдений, систематизация теоретических знаний по теме статьи.

Результаты исследований. Детонация — режим горения, при котором по веществу распространяется ударная волна, инициирующая химические реакции горения, поддерживающие движение ударной волны за счёт тепловыделения [1].

Отличие детонации от дефлаграции заключается в скорости распространения пламени: при детонации оно распространяется со сверхзвуковой скоростью, например, в воздухе — со скоростью более 300 м/с. При дефлаграции пламя распространяется с дозвуковой скоростью. Также для детонации не требуется внешний окислитель, в то время как при дефлаграции окислители и топливо смешиваются.

Существуют некоторые физико-химические особенности детонации:

- Образование детонационной волны. Комплекс состоит из ударной волны и зоны экзотермических химических реакций за ней.
- Самоподдерживающийся процесс. Энергия, освобождающаяся в зоне превращения, непрерывно поддерживает высокое давление в ударной волне.
- Скорость детонации зависит от состава и состояния детонирующего вещества и может достигать нескольких километров в секунду.
- Детонация может возникать в газах, жидкостях, конденсированных веществах и гетерогенных средах

Детонация - это прежде всего риски на промышленных объектах. Она лежит в основе действия взрывчатых веществ, которые широко применяются как в военном деле, так и в гражданской хозяйственной деятельности. Представления о тротиловом эквиваленте энергетического потенциала отдельных участков производства используются в правилах по обеспечению взрывобезопасности химических, нефтехимических и нефтеперерабатывающих производств. Детонация может представлять опасность на промышленных объектах, так как основными поражающими факторами детонационного взрыва являются ударная волна, характеризующаяся избыточным давлением и импульсом волны сжатия, и огненный шар раскалённых продуктов взрыва.

Риски на промышленных объектах, связанные с детонацией, включают возможные аварии из-за взрывов, которые сопровождаются ударными волнами и образованием сжатых газов.

Цели моделирования: прогнозирование последствий детонации, оптимизация защитных мер и снижение аварийности на промышленных объектах, в том числе на химических заводах и нефтехранилищах, важны для обеспечения безопасности и предотвращения разрушительных ситуаций.

Существуют разные физико-математические основы детонации. Разберём некоторые из них.

Модель детонации ZND — это одномерная модель процесса детонации взрывчатого вещества, предложенная независимо Яковом Зельдовичем, Джоном фон Нейманом и Вернером Дёрингом. В этой модели считается, что при распространении детонации вещество сначала нагревается при прохождении фронта ударной волны, а химические реакции начинаются в веществе спустя некоторое время, равное задержке самовоспламенения

Одно из уравнений модели ZND описывает сохранение энергии и имеет вид:

$$P_0 D + \rho_0 D(e_0 + D^2/2) = P(D - u) + \rho(D - u)(e + (D - u)^2/2) \quad (1),$$

где:

- D — скорость детонационной волны;
- $(D - u)$ — скорость продуктов относительно детонационной волны;
- P — давление;
- ρ — плотность;
- e — удельная внутренняя энергия.

Модель ZND (рисунок 1) предполагает, что сжатие топливной смеси происходит мгновенно во фронте ударной волны, а химические реакции начинаются в веществе спустя некоторое время, равное задержке самовоспламенения.

Некоторые ключевые параметры детонации:

- Скорость детонации: в газовых смесях достигает 1–3 км/с, в типичных конденсированных взрывчатых веществах составляет 6–9 км/с. Скорость детонации зависит от теплоты взрывного превращения, плотности взрывчатого вещества и состава продуктов детонации.
- Давление ударной волны: в газовых смесях достигает 5 ГПа, в конденсированных взрывчатых веществах — 40 ГПа. После прохождения детонационной волны сильно сжатые продукты реакции быстро расширяются — происходит взрыв.
- Точка Чепмена — Жуге (ТЧЖ). Это точка излома, соответствующая завершению химического превращения взрывчатого вещества в конечные продукты.

На детонацию влияет среда. Рассмотрим влияние некоторых факторов:

Геометрия объекта: на параметры детонации влияет взаимодействие заряда взрывчатого вещества с окружающей средой. Например, Ю. Б. Харитон показал, что влияние этого взаимодействия определяется диаметром цилиндрического заряда.

Наличие препятствий: многие факторы, способствующие турбулизации пламени (наличие на пути пламени крупноразмерных препятствий, увеличивающих поверхность пламени), приводят к взрыву парогазовых смесей.

Свойства горючих смесей: детонация газовых смесей возникает на некотором расстоянии от источника зажигания, который называется преддетонационным участком. Величина преддетонационного участка является

одной из характеристик, определяющих склонность перехода горения в детонацию конкретной газовой смеси.

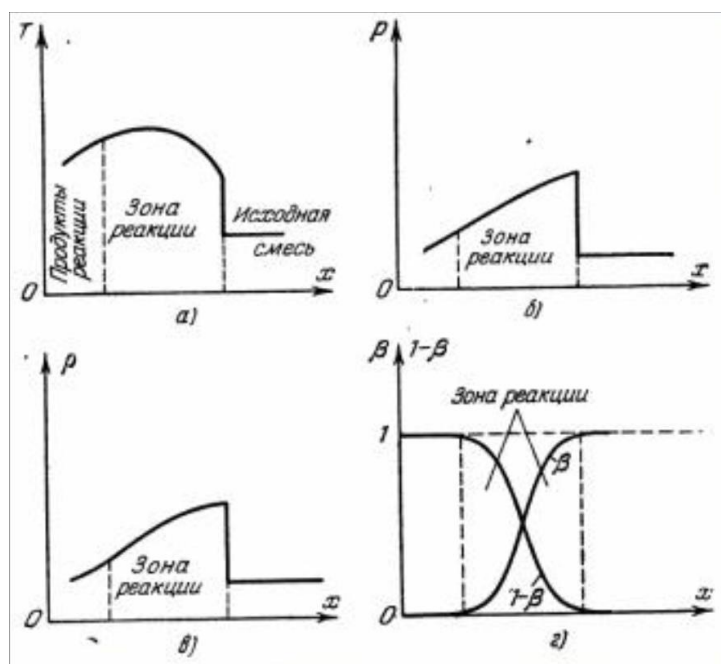


Рисунок 1. Модель детонации ZND

Существует много численных подходов в компьютерном моделировании. Рассмотрим некоторые из них.

Computational Fluid Dynamics (CFD) — это расчётный метод, позволяющий моделировать и изучать потоки жидкостей и газов.

В расчётах учитываются такие параметры, как передача тепла или массы, фазовые изменения веществ, химические реакции, механическое движение, напряжение и деформация твёрдых материалов под воздействием среды.

CFD начала использоваться в конце 1970-х годов в аэрокосмической промышленности — для расчёта параметров камер сгорания ракетных двигателей, физико-химических процессов при обтекании головных частей боеголовок и сверхзвуковых самолётов.

В атомной отрасли технология пришла в начале XXI века. С помощью CFD моделируют процессы в реакторных установках, в перспективе с ними можно обосновывать работоспособность элементов конструкции и безопасность. CFD-расчёты универсальны: их описание физики процесса и поведения среды можно применять для проектирования разного оборудования. Например, одним кодом можно рассчитать поведение среды и в насосах, и в реакторах, и в парогенераторах — даже аэродинамику автомобиля или самолёта.

Метод конечных элементов (МКЭ) — основной метод современной вычислительной механики, лежащий в основе подавляющего большинства современных программных комплексов, предназначенных для выполнения расчётов инженерных конструкций на ЭВМ.

Основная идея метода: любую непрерывную величину (перемещение, температура, давление и т.п.) можно аппроксимировать моделью, состоящей из отдельных элементов (участков). На каждом из этих элементов непрерывная величина аппроксимируется кусочно-непрерывной функцией, которая строится на значениях исследуемой непрерывной величины в конечном числе точек рассматриваемого элемента.

В МКЭ исследуемая конструкция мысленно разбивается на отдельные части — конечные элементы, соединяющиеся между собой в узлах. Совокупность соединённых между собой и прикреплённых к основанию конечных элементов образует расчётную схему, называемую конечноэлементной схемой или конечноэлементной моделью.

МКЭ используется для решения разнообразных задач как в области прочностных расчётов, так и во многих других сферах: гидродинамике, электромагнетизме, теплопроводности и др.

Гибридные модели DEM-CFD используются для учёта взаимодействия частиц и газовой фазы. С помощью DEM отслеживают положение и динамику каждой частицы, а CFD вычисляет состав, температуру и давление газовой фазы.

Некоторые преимущества метода DEM-CFD:

- Моделирование движения каждой частицы. Принимается во внимание взаимодействие частица — частица.
- Отсутствие ограничений на малые концентрации частиц и их распределение по размеру.
- Возможность моделировать частицы несферической формы.
- Учёт адгезивных свойств частиц (слипаемости) путём моделирования силы притяжения между парой частиц и между частицами и стенками.

Метод DEM-CFD (рисунок 2) подходит для решения задач в сложных двухфазных системах взаимодействия потока пылевоздушной фазы и твёрдого тела (частиц пыли).

Некоторые области применения метода: исследование эффективности аспирации оборудования и проектирование устройств пылеудаления.

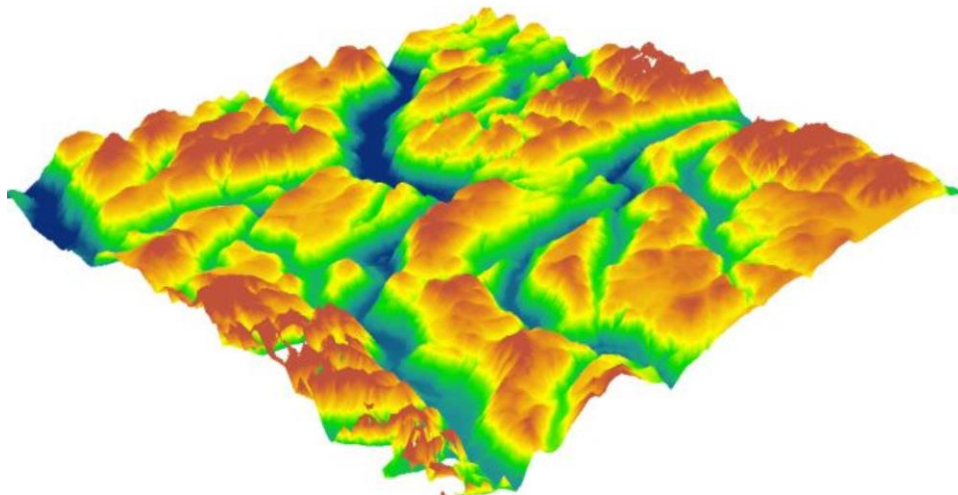


Рисунок 2. Рельеф местности DEM-CFD

Предсказание критических условий детонации на основе нейросетей возможно, например, в контексте прогнозирования взрывной нагрузки на поверхность подземного сооружения. В одном из исследований разработали метод на основе нейронной сети для изучения распределения нагрузки при близкой детонации.

Также с помощью нейросетевого моделирования изучают процесс детонации взрывчатых веществ и их смесей. Например, устанавливают, как плотность взрывчатого вещества, природа наполнителя и его количество влияют на характер изменения скорости детонации.

Для оптимизации сценариев аварий используют генеративные алгоритмы. Оптимизация сценариев связана с моделированием возможных катастроф и подготовкой к ним. Системы на основе анализа больших данных, машинного обучения и искусственного интеллекта способны предсказать потенциальные риски и оперативно среагировать в случае возникновения аварийных ситуаций.

Некоторые примеры применения таких систем:

- Выявление и предотвращение аварий. Методы машинного обучения и ИИ позволяют выявить аномалии в данных, которые могут свидетельствовать о начале аварийного процесса.
- Определение оптимальных маршрутов для аварийных служб и ресурсов. Например, системы могут предложить наиболее эффективные пути для доставки средств для ликвидации загрязнения.
- Мониторинг в реальном времени и корректировка действий. С помощью интегрированных платформ можно отслеживать эффективность проводимых мероприятий, а также получать данные о динамике загрязнения. Если система обнаруживает, что определённая стратегия не даёт должных результатов, она автоматически предложит альтернативные пути решения проблемы.

Программные инструменты и их возможности:

ANSYS Fluent (рисунок 3):

- Моделирование турбулентности: в программе представлено большое число моделей турбулентности, в том числе различные версии k - ϵ и k - ω моделей, модель Рейнольдсовых напряжений (RSM) для описания анизотропной турбулентности.
- Моделирование реагирующих потоков: можно детально моделировать химическое реагирование в газах или использовать специальные модели, которые позволяют уменьшить число реакций. Встроенные модели переноса примесей позволяют предсказывать распространение NO, SO и сажи.
- Моделирование многофазных потоков: программа позволяет моделировать поведение и взаимодействие произвольного числа фаз, в том числе любые комбинации жидких, твёрдых и газообразных, а также «гранулярных» фаз.
- Многовариантные расчёты и оптимизация: Ansys Fluent позволяет автоматизировать процесс проведения многовариантных расчётов для различных параметров проекта без использования пользовательского программирования.

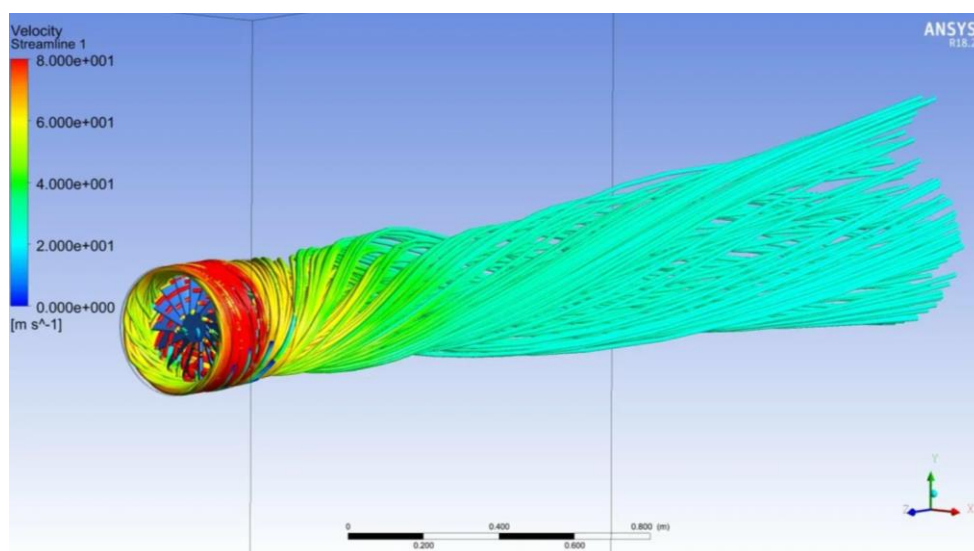


Рисунок 3. Проект Ansys Fluent 30 : CFD-анализ каналъного вентилятора

LS-DYNA (рисунок 4):

- Анализ динамического воздействия ударных волн на конструкции: программный комплекс позволяет моделировать взрывы и ударно-волновое нагружение конструкций, распространение ударных волн в различных средах.
- Ударостойкость конструкций: можно рассчитывать столкновения автомобилей и других транспортных средств, тесты на падение, аварийное разрушение промышленного оборудования и силовых установок, баллистический удар и проникновение тел в различные среды, прогрессирующее разрушение зданий и сооружений.
- Связанные динамические расчёты взаимодействия жидкостей и конструкций: можно моделировать падение и прострел контейнеров с жидкостью, аварийную посадку летательных аппаратов на воду, воздействие высокоскоростных струй жидкостей и газов на конструкции при больших деформациях и перемещениях.
- Квазистатические и динамические расчёты поведения материалов при больших деформациях: можно рассчитывать обработку металлов давлением, резку, задачи геомеханики и деформирования материалов со сложными физико-механическими свойствами.

OpenFOAM (рисунок 5):

- Решатель на основе частиц: в рамках платформы OpenFOAM разработан решатель с открытым исходным кодом для многомасштабного моделирования потоков разреженного газа.
- Физико-химические библиотеки: пакет OpenFOAM и физико-химические библиотеки применимы для численного моделирования процессов, протекающих в метано-воздушных смесях.

Расчёт безопасных расстояний между объектами в контексте промышленной безопасности важен, например, при проектировании складов взрывчатых материалов.

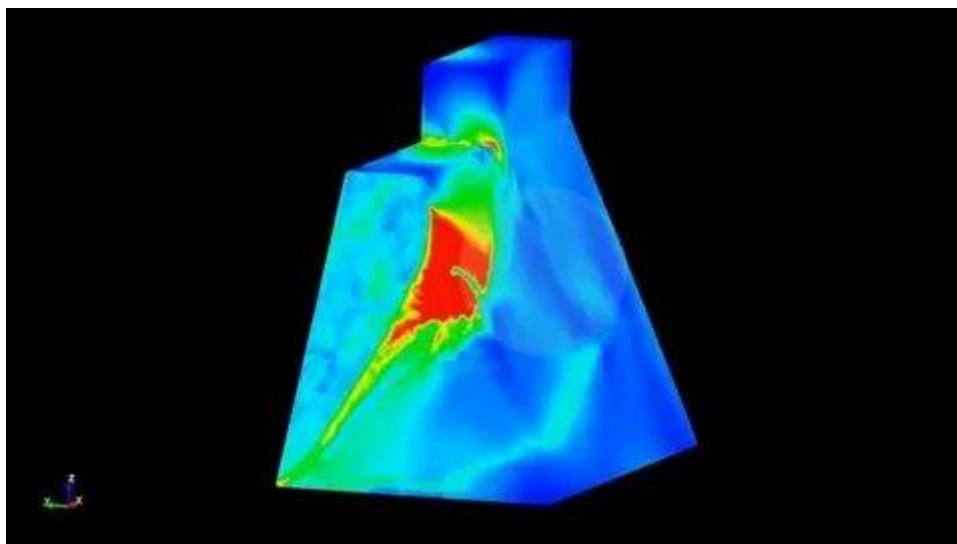


Рисунок 4. Анализ воздействия плотины Сабо на крупномасштабный селевой поток

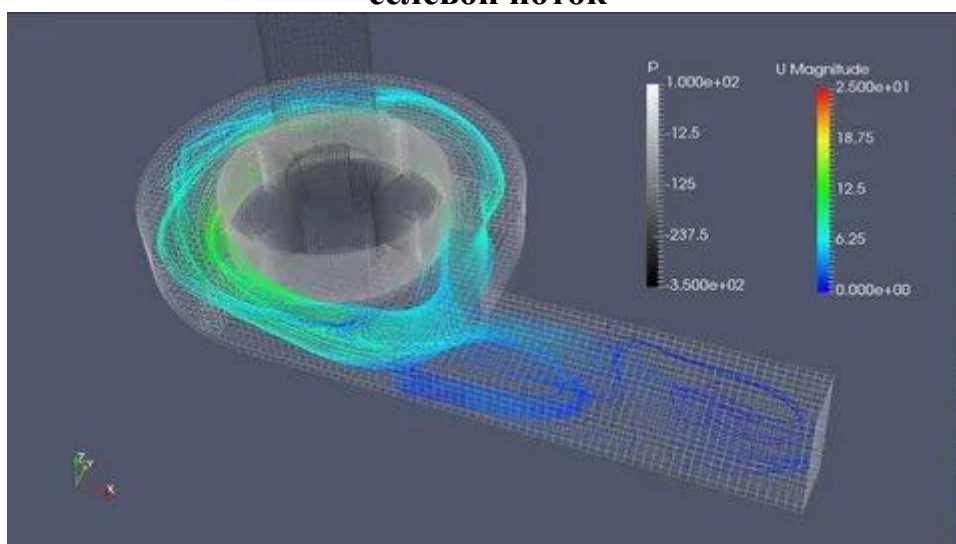


Рисунок 5. OpenFOAM: корпус центробежного насоса

При определении таких расстояний оценивают возможность передачи детонации между хранилищами ударной воздушной волной. На расчёт влияют такие параметры, как масса активного заряда, вид взрывчатых материалов и условия взрыва.

Методика расчёта описана в Федеральных нормах и правилах промышленной безопасности «Правила безопасности при производстве, хранении и применении взрывчатых материалов промышленного назначения».

Некоторые требования к расчёту безопасных расстояний:

- При размещении на земной поверхности нескольких объектов с взрывчатыми материалами (хранилищ, открытых площадок, пунктов изготовления, подготовки взрывчатых веществ) между ними должны соблюдаться расстояния, исключающие возможность передачи детонации при взрыве взрывчатых материалов на одном из объектов.

Для защиты людей, зданий, сооружений от поражающего действия ударной воздушной волны возможного взрыва на складах взрывчатых

материалов, площадках хранения взрывчатых материалов и пунктах производства взрывчатых материалов должны соблюдаться расстояния, обеспечивающие безопасность.

Оптимизация взрывозащитных экранов и аварийных клапанов в контексте промышленной безопасности включает следующие аспекты:

- Размещение технологического оборудования в специальных взрывозащитных конструкциях.
- Установка запорных и (или) отсекающих устройств для максимального снижения выбросов в окружающую среду горючих и взрывопожароопасных веществ при аварийной разгерметизации системы.
- Проектирование технологических схем для новых производств с учётом оборудования технологических установок или специальных систем аварийного освобождения. Такие системы должны находиться в постоянной готовности, исключать образование взрывоопасных смесей как в самих системах, так и в окружающей их атмосфере, а также развитие аварий.

Анализ аварийных сценариев - включает в себя моделирование возможных аварий и оценку их последствий для людей, имущества и окружающей среды.

Моделирование утечек газов и их детонации в замкнутых пространствах может проводиться с использованием различных методов, например:

- Использование моделей на основе машинного обучения. Например, для прогнозирования последствий утечки тяжёлого газа применяют алгоритмы, такие как XGBoost, которые позволяют быстро и точно предсказывать распространение опасных веществ. Также для моделирования утечек используют программное обеспечение для вычислительной гидродинамики (CFD).
- Применение методов, основанных на моделировании, таких как SLAB, AFTOX, ALOHA и PHAST. Эти модели помогают определить диапазоны воздействия различных опасных аварий.

Оценка последствий для персонала и инфраструктуры включает в себя определение вероятных зон действия поражающих факторов и причинённого ущерба (количества пострадавших).

Для оценки теплового излучения рассчитывают интенсивность теплового потока на горизонтальную и вертикальные поверхности, расположенные в соответствующей точке. При этом учитывают, что на характер воздействия промышленных зданий и сооружений в поражённой зоне влияет наличие, количество и состав возгораемых веществ, а также величина интенсивности воздействия теплового потока.

Некоторые уровни теплового излучения и их последствия:

- 32 кВт/м². Происходит разрушение соседних резервуаров, для человека эта зона является зоной безвозвратных потерь (вероятность смертельного исхода 90% при длительности экспозиции 30 сек.).

- 12 кВт/м². Происходит воспламенение деревянных конструкций, для человека это зона санитарных потерь (вероятность смертельного исхода уменьшается до 15%, вероятность ожогов второй степени составляет около 50% при длительности экспозиции 30 сек.).
- 4 кВт/м². Не представляют серьёзной опасности для объектов и для человека, защищённого специальной или брезентовой одеждой (вероятность получения ожогов первой степени для людей без спецодежды составляет 10% при длительности экспозиции 30 сек.).
- 1,4 кВт/м². Безопасные для объектов и человека расстояния, характеризующиеся отсутствием негативных последствий в течение длительного времени.

Обучение и подготовка.

Виртуальные тренажеры для сотрудников на основе симуляций позволяют обучать работников в условиях, приближённых к реальности. В алгоритм тренажёра закладывается определённая свобода действий и отражение их последствий.

Некоторые задачи, которые решают такие тренажеры:

- Обучение через действие. Сотрудник самостоятельно и последовательно выполняет задачу, при этом чувствует ответственность за свои решения.
- Аналитическая работа над ошибками. После выполнения задания сотрудник получает обратную связь о правильности своих действий. Он может проанализировать свои действия и пройти симуляцию ещё раз, сделав работу над ошибками.
- Моделирование аварийных ситуаций. Можно смоделировать аварийную ситуацию и провести обучение персонала для отработки действий по её предотвращению или ликвидации последствий.
- Скорость подготовки. Можно быстро обучать и экзаменовать большое количество сотрудников благодаря лёгкому масштабированию цифровых обучающих материалов на подразделения и филиалы и единому стандарту обучения.

Примеры виртуальных тренажёров:

- VR-тренажёр по работе с электрооборудованием. Позволяет обучать оперативный и ремонтный персонал электросетевой компании, в том числе отработке таких сложных задач, как замена выключателя и изолирующей подвески.
- «Виртуальный завод 2.0». Приложение предоставляет возможность пройти все этапы реальной инспекции фармацевтического завода, начиная от прибытия на территорию предприятия и встречи с сотрудниками, заканчивая полным осмотром производственных и складских помещений, оборудования и процесса производства твёрдых лекарственных форм.
- VR-тренажёр по пожарной безопасности. Позволяет обучать сотрудников технике безопасности и комплексу действий при возникновении пожара как на производстве, так и в офисном или складском помещении.

Разработка регламентов эвакуации с учётом результатов моделирования позволяет оценить эффективность предлагаемых мер или комплекса вмешательств. Моделирование развития пожара может помочь определить возможные пути эвакуации при возникновении пожара в определённом месте здания.

Алгоритм применения моделирования развития пожара и эвакуации:

1. Производится анализ, определяются сценарии, расположение очагов пожара, расчётная область для моделирования развития пожара, расположение людей и исследуемые пути эвакуации.

2. Для выбранных сценариев выполняется моделирование развития пожара, определяется время срабатывания пожарных извещателей.

3. Определяется время начала эвакуации, выполняется моделирование эвакуации при принятых проектных решениях для выбранных сценариев пожара, проверяется выполнение условий безопасности.

4. В случае необходимости вносятся изменения для уменьшения времени начала эвакуации до выполнения условий.

5. При невозможности достижения требуемых условий безопасности изменяется набор исходных данных, применяются дополнительные меры, проверяется их эффективность.

6. Разрабатываются алгоритмы работы системы оповещения и управления эвакуацией с учётом требований 123-ФЗ.

Таким образом, можно отметить, что компьютерное моделирование – это ключ к «предсказанию будущего» в промышленной безопасности. Изучение моделирования и внедрение его в практическую деятельность необходимо, так как эти инновации достаточно удобные для пользования и актуально для деятельности. Так же моделирование есть необходимость сотрудничества с наукой и бизнесом для минимизации рисков.

Заключение. Современные методы компьютерного моделирования процессов детонации играют ключевую роль в обеспечении промышленной безопасности. Развитие алгоритмов и вычислительных технологий позволяет создавать высокоточные модели, которые используются для анализа и прогнозирования поведения взрывоопасных веществ. Эти инструменты помогают исследователям и инженерам лучше понимать механизмы детонации, выявлять потенциальные риски и разрабатывать эффективные стратегии предотвращения аварий. Применение компьютерного моделирования в промышленности не ограничивается только исследовательскими задачами; оно стало неотъемлемой частью проектирования новых систем, оптимизации процессов и обучения персонала. Эффективное сотрудничество между учеными, инженерами и представителями промышленности позволяет переносить теоретические наработки в практическую плоскость, что, в свою очередь, способствует повышению уровня надежности и безопасности производственных процессов. Таким образом, интеграция современных методов моделирования в промышленную практику создает предпосылки для

значительного снижения рисков, связанных с детонационными процессами, и вносит вклад в устойчивое развитие отрасли.

Список источников

1. Кирпичников, А.П. Автоматизированная система моделирования параметров быстропротекающих процессов /А.П. Кирпичников, С.А. Ляшева, О.Т. Шипина // Вестник Казанского технологического университета. – Казань: КНИТУ, 2014. - Т. 17. № 13. – С. 349-352.
2. Сугак, Н.Ю. Расчёт взрывчатых характеристик ВВ: учебное пособие / Н.Ю. Сугак, С.В. Мочалов – Бийск: Изд-во алт. гос. техн. ун-та, 2013. – 106с.
3. Илларионов, М.Г. Прогнозирование на основе аппарата нейронных сетей / М.Г. Илларионов, А.П. Кирпичников, Р.Р. Латыпова Вестник Казанского технологического университета. – Казань: КНИТУ, 2012. - Т. 15. № 1. – С. 163-164
4. Применение цифровых двойников технологических машин в АПК при эксплуатации и сервисном обслуживании / А. А. Жиздюк, В. Н. Буйлов, С. В. Чумакова, М. Н. Ахилбеков // Агроинженерия. – 2025. – Т. 27, № 1. – С. 20-25. – DOI 10.26897/2687-1149-2025-1-20-25. – EDN CCHMVF.
5. Жиздюк, А. А. Конструирование и расчет наземных транспортно-технологических машин / А. А. Жиздюк, Л. А. Журавлева, М. В. Карпов. – Москва : Общество с ограниченной ответственностью «Научно-издательский центр ИНФРА-М», 2024. – 288 с. – ISBN 978-5-16-018326-8. – DOI 10.12737/1977999. – EDN KGFEES.
6. Патент № 2829333 С2 Российская Федерация, МПК G01N 21/01. Автоматическая система контроля параметров промышленных выбросов : № 2023126522 : заявл. 13.04.2023 : опубл. 30.10.2024 / А. А. Жиздюк, М. В. Карпов, А. В. Агеев, В. И. Балабанов ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Российский государственный аграрный университет - МСХА имени К.А. Тимирязева". – EDN DISKDU.
7. Буйлов, В. Н. Математическое моделирование в исследовании структуры почвы / В. Н. Буйлов, С. В. Чумакова, А. А. Жиздюк // Вавиловские чтения - 2023 : Сборник статей Международной научно-практической конференции, посвященной 136-летию со дня рождения академика Н.И. Вавилова, Саратов, 23–25 ноября 2023 года. – Саратов: Саратовский государственный университет генетики, биотехнологии и инженерии имени Н.И. Вавилова, 2023. – С. 105-111. – EDN GLKLXQ.
8. Жиздюк, А. А. Цифровые решения для полевых работ / А. А. Жиздюк, В. Н. Буйлов, С. В. Чумакова // Вавиловские чтения - 2023 : Сборник статей Международной научно-практической конференции, посвященной 136-летию со дня рождения академика Н.И. Вавилова, Саратов, 23–25 ноября 2023 года. – Саратов: Саратовский государственный университет генетики, биотехнологии и инженерии имени Н.И. Вавилова, 2023. – С. 296-303. – EDN KHNHPWN.

References

1. Kirpichnikov, A.P. Automated system for modeling the parameters of fast processes / A.P. Kirpichnikov, S.A. Lyasheva, O.T. Shipina // Bulletin of the Kazan Technological University. - Kazan: KNITU, 2014. - Vol. 17. No. 13. - Pp. 349-352.
2. Sugak, N.Yu. Calculation of explosive characteristics of explosives: a tutorial / N.Yu. Sugak, S.V. Mochalov - Biysk: Publishing house of the Altai State Technical University, 2013. - 106 p.
3. Illarionov, M.G. Forecasting based on the apparatus of neural networks / M.G. Illarionov, A.P. Kirpichnikov, R.R. Latypova Bulletin of the Kazan Technological University. – Kazan: KNITU, 2012. - Vol. 15. No. 1. – Pp. 163-164
4. Application of digital twins of technological machines in the agro-industrial complex during operation and maintenance / A. A. Zhizdyuk, V. N. Buylov, S. V. Chumakova, M. N. Akhilbekov // Agrozhenariya. – 2025. – Vol. 27, No. 1. – Pp. 20-25. – DOI 10.26897/2687-1149-2025-1-20-25. – EDN CCHMVF.
5. Zhizdyuk, A. A. Design and calculation of ground-based transport and technological machines / A. A. Zhizdyuk, L. A. Zhuravleva, M. V. Karpov. – Moscow: Limited Liability Company "Scientific Publishing Center INFRA-M", 2024. – 288 p. – ISBN 978-5-16-018326-8. – DOI 10.12737/1977999. – EDN KGFECC.
6. Patent No. 2829333 C2 Russian Federation, IPC G01N 21/01. Automatic system for monitoring industrial emission parameters: No. 2023126522: declared 13.04.2023; published 30.10.2024 / A. A. Zhizdyuk, M. V. Karpov, A. V. Ageyev, V. I. Balabanov; Applicant Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Russian State Agrarian University - Moscow Timiryazev Agricultural Academy". – EDN DISKDU.
7. Builov, V. N. Mathematical Modeling in the Study of Soil Structure / V. N. Builov, S. V. Chumakova, A. A. Zhizdyuk // Vavilov Readings - 2023: Collection of articles from the International Scientific and Practical Conference dedicated to the 136th anniversary of the birth of Academician N. I. Vavilov, Saratov, November 23–25, 2023. – Saratov: Saratov State University of Genetics, Biotechnology and Engineering named after N. I. Vavilov, 2023. – pp. 105–111. – EDN GLKLXQ.
8. Zhizdyuk, A. A. Digital solutions for field work / A. A. Zhizdyuk, V. N. Buylov, S. V. Chumakova // Vavilov Readings - 2023: Collection of articles from the International Scientific and Practical Conference dedicated to the 136th anniversary of the birth of Academician N.I. Vavilov, Saratov, November 23–25, 2023. – Saratov: Saratov State University of Genetics, Biotechnology and Engineering named after N.I. Vavilov, 2023. – P. 296–303. – EDN KHHPWH.

Статья поступила в редакцию 26.06.2026; одобрена после рецензирования 30.07.2026; принята к публикации 17.08.2026.
The article was submitted 26.06.2026; approved after reviewing 30.07.2026; accepted for publication 17.08.2026.