

УДК 614.849

ПРОЧНОСТНОЙ АНАЛИЗ КАК ОСНОВА ПОВЫШЕНИЯ ПОЖАРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ТРУБОПРОВОДОВ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Аксенов С.Г.

д-р э.н., профессор,

*ФГБОУ ВО Уфимский университет науки и технологий,
РФ, г. Уфа*

Николаев В.А.

студент,

*ФГБОУ ВО Уфимский университет науки и технологий,
РФ, г.Уфа*

Аннотация

В статье рассматривается роль прочностного анализа как ключевого инструмента повышения пожарной безопасности трубопроводов энергетических систем. Обосновывается необходимость перехода от упрощённых нормативных расчётов к физически обоснованным, термомеханически связанным моделям, способным учитывать нестационарность пожарного воздействия, нелинейность свойств материалов при высоких температурах и геометрическую сложность реальных конструкций. Анализируются современные подходы к оценке напряжённо-деформированного состояния трубопроводов в условиях пожара, включая численное моделирование, вероятностную оценку рисков, учёт накопленного ущерба и интеграцию с системами мониторинга.

Ключевые слова: пожарная безопасность, трубопроводы энергетических систем, прочностной анализ.

STRENGTH ANALYSIS AS A BASIS FOR IMPROVING FIRE SAFETY OF POWER SYSTEM PIPELINES

Aksyonov S.G.

Doctor of Economics, Professor,

Ufa University of Science and Technology,

Ufa, Russian Federation

Nikolaev V.A.

Student,

Ufa University of Science and Technology,

Ufa, Russian Federation

Annotation

The article examines the role of strength analysis as a key tool for improving the fire safety of pipelines in energy systems. The necessity of moving from simplified normative calculations to physically sound, thermomechanically coupled models capable of taking into account the unsteadiness of fire effects, the nonlinearity of material properties at high temperatures and the geometric complexity of real structures is substantiated. Modern approaches to assessing the stress-strain state of pipelines in fire conditions are analyzed, including numerical modeling, probabilistic risk assessment, accounting for accumulated damage and integration with monitoring systems.

Keywords: fire safety, pipelines of energy systems, strength analysis.

Современные энергетические системы представляют собой сложные инженерные комплексы, в которых трубопроводы играют ключевую роль в транспортировке теплоносителей, горючих жидкостей и газов. В условиях повышенных температур, давлений и агрессивных рабочих сред такие системы подвержены значительным механическим и термическим нагрузкам, что делает их уязвимыми к возникновению аварийных ситуаций, включая пожары. Обеспечение пожарной безопасности трубопроводов становится неотъемлемой частью проектирования, эксплуатации и технического обслуживания энергетической инфраструктуры. Одним из наиболее эффективных подходов к решению этой задачи является использование методов прочностного анализа, позволяющего оценить устойчивость конструкции к экстремальным термомеханическим воздействиям и своевременно выявить потенциально опасные участки.

Прочностной анализ как инженерная дисциплина возник на стыке теоретической механики, материаловедения и прикладной математики, и за последние десятилетия претерпел значительную эволюцию благодаря развитию вычислительных технологий. В контексте пожарной безопасности его значение многократно возросло, поскольку именно механическая целостность конструкции определяет, будет ли утечка горючей среды локализована или перерастёт в масштабную аварию. При пожаре трубопровод подвергается комплексному воздействию: с одной стороны, резкое повышение температуры снижает прочностные характеристики материала, с другой — возможное увеличение давления внутри трубы создаёт дополнительные напряжения. Взаимодействие этих факторов требует системного подхода, который и обеспечивает прочностной анализ [3].

Особенность термомеханического поведения трубопроводов при пожаре заключается в нестационарности всех параметров. Температура изменяется не только во времени, но и по сечению стенки трубы, создавая градиенты, которые сами по себе генерируют внутренние напряжения. Эти термические напряжения могут превышать допустимые пределы даже при отсутствии внутреннего давления, особенно в участках с геометрическими концентраторами — изгибах, тройниках, опорах. Прочностной анализ позволяет количественно оценить эти эффекты и выявить критические зоны, требующие усиления или дополнительной защиты [1].

Традиционные методы расчёта, основанные на нормативных документах, часто предполагают равномерный нагрев или использование усреднённых кривых стандартных пожаров. Хотя такие подходы обеспечивают определённый запас безопасности, они не отражают реального разнообразия сценариев возгорания. Современные энергетические объекты характеризуются сложной пространственной организацией, наличием множества препятствий для распространения пламени и локальных источников горения, что приводит к неоднородному тепловому воздействию. Прочностной анализ, базирующийся на физически обоснованных моделях, способен учитывать эту неоднородность и тем самым повышать точность прогноза поведения конструкции [4].

Важной задачей является также определение времени до отказа — интервала, в течение которого трубопровод сохраняет герметичность и несущую способность при заданном пожарном сценарии. Этот параметр имеет решающее значение для организации аварийно-спасательных работ,

эвакуации персонала и принятия решений о локализации инцидента. Прочностной анализ позволяет не просто констатировать факт разрушения, но и предсказать его развитие во времени, учитывая такие процессы, как ползучесть, релаксация напряжений и термическое размягчение материала. Такой прогноз становится основой для разработки адаптивных систем безопасности, способных реагировать на изменение состояния конструкции в реальном времени.

Современные методы численного моделирования, в первую очередь метод конечных элементов, позволяют строить высокодетализированные модели трубопроводов, включая сложные узлы соединений, изоляционные покрытия и взаимодействие с опорными конструкциями. Такие модели способны воспроизводить нелинейное поведение материалов при высоких температурах, включая фазовые превращения, изменение теплофизических свойств и анизотропию. Это особенно важно для сталей, применяемых в энергетике, чьи характеристики при температурах выше 500°C существенно отличаются от комнатных значений. Прочностной анализ, основанный на таких моделях, обеспечивает более реалистичную оценку пожарной устойчивости по сравнению с упрощёнными методами [5].

Не менее важным аспектом является учёт истории нагружения конструкции. Трубопроводы энергетических систем в течение срока службы подвергаются множеству циклов пуска и останова, что приводит к накоплению усталостных повреждений. При пожаре такие повреждения могут стать очагами разрушения, даже если текущее термомеханическое воздействие формально не превышает допустимых пределов. Поэтому современный подход к прочностному анализу включает в себя оценку как текущего состояния, так и накопленного ущерба, что требует интеграции методов механики разрушения и теории повреждаемости.

Ещё одним направлением развития является вероятностный подход к оценке пожарной безопасности. Вместо детерминированного сценария анализ проводится по множеству возможных вариантов развития пожара с учётом статистических данных о его интенсивности, продолжительности и пространственном распределении. Это позволяет оценить не только наихудший, но и наиболее вероятный исход, что особенно полезно при оптимизации затрат на защитные мероприятия. Прочностной анализ в вероятностной постановке становится инструментом управления рисками, а не просто проверки соответствия нормам [3].

Критически важными для достоверности результатов являются корректная постановка граничных условий и выбор физических моделей материала. Неправильная оценка коэффициента теплоотдачи, излучательной способности поверхности или теплоёмкости изоляции может привести к существенной ошибке в расчёте температурного поля, а, следовательно, и в оценке напряжённого состояния. Поэтому всё большее внимание уделяется экспериментальной валидации численных моделей на основе данных натурных испытаний или мониторинга реальных объектов. Только такой синтез расчёта и измерения обеспечивает достаточный уровень доверия к результатам анализа.

Особое внимание в рамках прочностного анализа уделяется соединительным элементам — сварным швам, фланцевым соединениям, компенсаторам и опорам. Именно в этих зонах наблюдаются максимальные концентрации напряжений, обусловленные как геометрическими особенностями, так и возможными дефектами изготовления. При пожаре такие участки становятся наиболее уязвимыми, поскольку локальный перегрев может привести к разгерметизации даже при сохранении целостности основной трубы. Прочностной анализ позволяет выявить эти «слабые звенья» и предложить меры по их усилению — от изменения конструкции до применения специальных жаростойких покрытий [2].

Важно также учитывать взаимодействие трубопровода с окружающими конструкциями. При пожаре соседние элементы могут деформироваться, передавая дополнительные нагрузки на трубу, или, наоборот, экранировать её от прямого воздействия пламени. Такое взаимовлияние сложно учесть в рамках локального расчёта, поэтому всё чаще используются комплексные модели всего технологического блока. Это позволяет получить более полную картину термомеханического состояния и избежать ошибок, связанных с изолированным рассмотрением отдельных компонентов [5].

В контексте перехода к новым видам энергоносителей — таким как водород, синтетические топлива или аммиак — требования к пожарной безопасности трубопроводов становятся ещё более жёсткими. Эти среды обладают более широким диапазоном воспламеняемости, низкой энергией активации и высокой скоростью горения, что увеличивает потенциальную разрушительную силу аварии. Прочностной анализ позволяет адаптировать существующие методики к новым условиям, оценивая, как изменение

свойств рабочей среды влияет на термомеханическую устойчивость конструкции при возгорании.

Следует отметить, что повышение пожарной безопасности за счёт прочностного анализа не должно приводить к неоправданному удорожанию проекта. Оптимизация заключается в точечном усилении только тех участков, которые действительно находятся в зоне риска, а не в равномерном увеличении толщины стенки или применении дорогих жаропрочных сплавов по всей длине. Прочностной анализ позволяет выявить такие «горячие точки» и сконцентрировать ресурсы на их защите, обеспечивая баланс между надёжностью и экономичностью [4].

Развитие систем мониторинга и диагностики создаёт предпосылки для интеграции прочностного анализа в цифровые двойники трубопроводных систем. В реальном времени данные с датчиков температуры, деформации и давления могут использоваться для корректировки расчётных моделей и оценки остаточного ресурса конструкции. Такой подход позволяет перейти от планово-предупредительного обслуживания к предиктивному, когда вмешательство осуществляется только при реальном ухудшении состояния. Это особенно актуально для критически важных участков, где остановка системы сопряжена с большими экономическими или экологическими издержками.

Немаловажную роль играет и нормативное регулирование. Несмотря на широкое применение численных методов, многие нормативные документы всё ещё ориентированы на упрощённые расчёты, что затрудняет легализацию инновационных решений. Поэтому развитие прочностного анализа как инструмента пожарной безопасности требует не только технического, но и нормативного сопровождения — разработки методических рекомендаций, руководств по моделированию и критериев приёмки результатов. Это позволит унифицировать подходы и повысить доверие к расчётным обоснованиям со стороны регулирующих органов [2].

Также нельзя игнорировать человеческий фактор. Даже самая точная модель окажется бесполезной, если инженеры и эксплуатационный персонал не обладают достаточной квалификацией для интерпретации её результатов. Поэтому важно развивать образовательные программы, включающие основы термомеханики, численного моделирования и анализа рисков. Культура безопасности должна включать в себя не только соблюдение правил, но и

понимание физических принципов, лежащих в основе устойчивости конструкций при экстремальных воздействиях.

В будущем можно ожидать дальнейшего сближения прочностного анализа с методами искусственного интеллекта. Нейросетевые модели, обученные на массивах данных численного моделирования, смогут мгновенно оценивать пожарную устойчивость конструкции по минимальному набору параметров, что сделает анализ доступным даже для небольших предприятий. При этом физически обоснованные модели станутся эталоном для обучения и верификации таких систем, обеспечивая их надёжность и интерпретируемость.

Таким образом, прочностной анализ выступает не просто как инструмент расчёта, но как стратегический элемент комплексной системы пожарной безопасности. Его применение позволяет не только оценить текущее состояние трубопровода, но и спрогнозировать его поведение в нештатных ситуациях, что является необходимым условием для обеспечения устойчивости и надёжности энергетической инфраструктуры в современных условиях.

Библиографический список

1. Аксенов С.Г., Семёнов С.И. Анализ пожарной безопасности на объектах нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности: стратегии, вызовы и инновации // Экономика строительства. 2023. № 11. С. 214-217.
2. Аксенов С.Г., Ирниченко О.А. Обеспечения пожарной безопасности нефтяных и газовых скважин // Экономика строительства. 2023. № 7. С. 41-45.
3. Бедненко А.А. Аудит пожарной безопасности // Инновационная наука. 2019.
4. Кошелев В. Ю., Билинский Ю. А. Совершенствование системы обеспечения пожарной безопасности на газотурбинных электростанциях // Вестник магистратуры. 2022. №12-1 (135). С. 14-16.
5. Земский Г.Т., Ильичев А.В., Кондратюк Н.В. Пожарная безопасность электрогенераторных установок // Актуальные вопросы пожарной безопасности. 2020.