

УДК 519.85

Е.Л. Гусев, д-р техн. наук, профессор

ИПНГ СО РАН, г. Якутск, Россия

Тел./Факс: +7 411 2 390-630; E-mail: elgusev@mail.ru

## РАЗРАБОТКА И ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ОПТИМИЗАЦИИ СТРУКТУРЫ ТРУБОПРОВОДНЫХ СИСТЕМ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ ФАКТОРОВ ВНЕШНЕЙ СРЕДЫ

*В последние десятилетия, в связи с разработкой новых композиционных материалов с широким разнообразием физико-механических и химических свойств возникает проблема разработки физической и геометрической структуры трубопроводных систем, обеспечивающей наиболее эффективный режим транспорта в условиях экстремальных факторов внешней среды. Показано, что в условиях экстремальных факторов внешней среды, физико-механическая и геометрическая структура неоднородных композиционных покрытий трубопроводных систем оказывает существенное влияние на режимы транспортировки. В соответствии с этим в условиях действия экстремальных факторов внешней среды разработка структурно-неоднородных покрытий из композиционных материалов может позволить создавать композиции, одновременно сочетающие высокие химические и физико-механические свойства, не достижимые для однородных покрытий. Направленный выбор физической и геометрической структуры покрытий из композиционных материалов позволяет достичь существенного синергетического эффекта в улучшении свойств неоднородных покрытий по сравнению с однородными. Усложнение структуры неоднородного композиционного покрытия, в частности, увеличение числа его слоев может позволить существенно улучшить его физико-механические свойства, а также разрабатывать композиционные покрытия, в которых отсутствуют характерные недостатки покрытий, имеющих более простую структуру и, в частности, меньшее число слоев. Для сформулированных многокритериальных задач оптимального проектирования физической и геометрической структуры трубопроводных систем, обеспечивающих наиболее эффективный режим транспорта, были сформулированы эффективные методы решения, предложены эффективные способы сведения данной задачи к задаче оптимизации с одним критерием, рассмотрены наиболее важные постановки многокритериальных задач оптимального проектирования физической и геометрической структуры трубопроводных систем, в которых может быть выделен основной, основополагающий критерий. Предложены наиболее эффективные методы решения такого класса задач.*

**Ключевые слова:** оптимальная конструкция, композитные материалы, методы оптимизации, необходимое состояние оптимальности, оптимальной структуры композиционных построений, системы труб, структурно-неоднородные покрытия.

Работа выполнена при поддержке Российского Фонда фундаментальных исследований - грант № 13-08-00229.

В последние годы значительное внимание уделяется проблемам повышения прочности, надежности, ресурса, интенсификации систем трубопроводного транспорта при воздействии экстремальных факторов внешней среды [1-7]. Современные подходы к решению данных проблем связаны с математическим и компьютерным моделирова-

нием процессов функционирования трубопроводных систем [8-12]. Разработка адекватных математических моделей функционирования трубопроводного транспорта является основой для разработки эффективных методов численного расчета и оптимизации режимов трубопроводного транспорта и принятия на их основе оптимальных решений [12-15].

При проектировании и эксплуатации трубопроводных систем, прокладываемых по территориям, характеризующимся широким разнообразием экстремальных факторов, высокой сейсмической активностью, значительными экстремальными перепадами температур, необходимо предусматривать дополнительные возможности обеспечения требуемых режимов транспортировки сред. При этом в условиях значительного перепада экстремальных температур необходимо учитывать зависимость основных параметров транспортируемых сред от температуры, а также влияние такой зависимости на режимы транспортировки.

Задача обеспечения заданных режимов трубопроводного транспорта может решаться как на стадии проектирования трубопроводных систем, так и на последующей стадии эксплуатации. В связи с большой протяженностью трубопроводных систем различного назначения, многообразием климатических и геофизических условий эксплуатации, одним из перспективных направлений повышения эффективности трубопроводных систем, является применение при их проектировании и эксплуатации полимерных и композиционных материалов. В последние десятилетия, в связи с разработкой новых композиционных материалов с широким разнообразием физико-механических и химических свойств возникает проблема разработки физической и геометрической структуры трубопроводных систем, обеспечивающей наиболее эффективный режим транспорта в условиях экстремальных факторов внешней среды [13-18].

Показано, что в условиях экстремальных факторов внешней среды, физико-механическая и геометрическая структура неоднородных композиционных покрытий трубопроводных систем оказывает существенное влияние на режимы транспортировки. В соответствии с этим в условиях действия экстремальных факторов внешней среды разработка структурно-неоднородных покрытий из композиционных материалов может позволить создавать композиции, одновременно сочетающие высокие химические и физико-механические свойства, не достижимые для однородных покрытий. Направленный выбор физической и геометрической структуры покрытий из композиционных материалов позволяет достичь существенного синергетического эффекта в улучшении свойств неоднородных покрытий по сравнению с однородными. Усложнение структуры неоднородного композиционного покрытия, в частности, увеличение числа его слоев может позволить существенно улучшить его физико-механические свойства, а также разрабатывать композиционные покрытия, в которых отсутствуют характерные недостатки покрытий, имеющих более простую структуру и, в частности, меньшее число слоев.

В соответствии с этим, возникает важная проблема направленного выбора физической и геометрической структуры как самой трубопроводной системы, так и физико-механической и геометрической структуры внешних и внутренних композиционных покрытий, обеспечивающей наиболее эффективный режим функционирования трубопроводной системы в условиях неблагоприятных сочетаний экстремальных факторов внешней среды [16-18].

В рамках сформулированной вариационной постановки проведено математическое и компьютерное моделирование процессов функционирования трубопроводного транспорта. К рассматриваемой вариационной постановке может быть сведен широкий

круг задач оптимального проектирования физической и геометрической структуры трубопроводных систем при воздействии экстремальных факторов внешней среды. В качестве математической модели функционирования трубопроводных систем в условиях экстремальных факторов внешней среды, в рассматриваемой вариационной постановке, принята система уравнений неразрывности, состояния, сохранения энергии и импульса. Теплообмен транспортируемой по трубопроводной системе среды с окружающей внешней средой считается происходящим по закону Ньютона [12, 19].

Вариационная постановка связана с проблемой направленного выбора физической и геометрической структуры как самой трубопроводной системы, так и физической и геометрической структуры внешних и внутренних композиционных покрытий, обеспечивающей наиболее эффективный режим функционирования трубопроводной системы в условиях неблагоприятных сочетаний экстремальных факторов внешней среды.

На основе разработанной методики оптимального проектирования, проведенных вычислительных экспериментов, исследованы особенности функционирования трубопроводного транспорта в условиях экстремальных факторов внешней среды.

Для сформулированных многокритериальных задач оптимального проектирования физической и геометрической структуры трубопроводных систем, обеспечивающих наиболее эффективный режим транспорта, были сформулированы эффективные методы решения, предложены эффективные способы сведения данной задачи к задаче оптимизации с одним критерием, рассмотрены наиболее важные постановки многокритериальных задач оптимального проектирования физической и геометрической структуры трубопроводных систем, в которых может быть выделен основной, основополагающий критерий. Предложены наиболее эффективные методы решения такого класса задач.

На основе исследования моделей функционирования трубопроводного транспорта установлены важные закономерности влияния физической и геометрической структуры покрытий на функционирование трубопроводного транспорта в условиях экстремальных факторов внешней среды. Установлены особенности физической и геометрической структуры покрытий, определяющие оптимальный режим трубопроводного транспорта в условиях экстремальных факторов. Разработана методика оптимального проектирования физической и геометрической структуры покрытий, обеспечивающих оптимальный режим трубопроводного транспорта в условиях экстремальных факторов внешней среды. Установленные качественные закономерности могут быть использованы для экспериментального подбора оптимальной толщины теплоизоляции трубопроводных систем, в случае, если исходные данные, описывающие динамику функционирования трубопроводной системы, являются неполными или недостаточно точными.

Полученные на основе математического и компьютерного моделирования результаты, проведенные вычислительные эксперименты, позволяют сделать вывод, что направленный выбор физической и геометрической структуры теплоизоляции трубопроводной системы может позволить эффективно обеспечить требуемые режимы функционирования трубопроводных систем большой протяженности в условиях экстремально низких отрицательных температур внешней среды.

Установленные на основе математического и компьютерного моделирования результаты, проведенные вычислительные эксперименты, закономерности влияния физической и геометрической структуры теплоизоляции на режимы функционирования трубопроводных систем большой протяженности в условиях как умеренно низких отрицательных температур, так и экстремально низких отрицательных температур

внешней среды, позволяют разработать эффективные рекомендации по эффективному выбору физической и геометрической структуры теплоизоляции для достижения оптимальных режимов функционирования трубопроводных систем большой протяженности в условиях значительных перепадов температур окружающей среды.

Установлено, что оптимальный выбор теплоизоляции позволяет эффективно поддерживать требуемые режимы функционирования для трубопроводных систем значительной протяженности при минимальном расходе теплоизолирующего материала. При транспортировке нефти в условиях экстремально низких отрицательных температур внешней среды, увеличение длины трубопроводных систем, может приводить к более существенному увеличению оптимальной толщины теплоизоляции  $d_{opt}$  для поддержания требуемого режима транспортировки нефти, чем в условиях умеренно низких отрицательных температур внешней среды.

Для случая экстремально низких отрицательных температур внешней среды, существует критическое значение длины трубопровода, начиная с которой достигается стабилизированное значение оптимальной толщины теплоизоляции трубопроводных систем, выше которого оптимальное значение толщины теплоизоляции не зависит от дальнейшего увеличения длины трубопровода, т.е.

$$d_{opt}^* = d_{opt}(L_{krit}) = const,$$

$$d_{opt} \equiv d_{opt}^*, L \geq L_{krit}.$$

Данное значение  $L_{krit}$  определяется достигнутым балансом между температурным режимом подогрева в начале трубопровода и уровнем экстремально низких отрицательных температур внешней среды. При этом критическое значение длины трубопроводных систем  $L_{krit}$ , начиная с которого стабилизируется оптимальное значение толщины теплоизоляции  $d_{opt} = const$ , не зависит от уровня отрицательной температуры внешней среды, т.е. от того является ли отрицательная температура внешней среды умеренно или экстремально низкой. Тем не менее, уровень значения отрицательной температуры внешней среды существенно влияет на оптимальную толщину теплоизоляции трубопроводной системы -  $d_{opt}$ . Увеличение диаметра трубопроводной системы сопровождается уменьшением значения  $L_{krit}$ . А при достаточно большом диаметре трубопроводной системы оптимальное значение толщины теплоизоляции  $d_{opt}$  является постоянным для трубопроводов любой длины.

В случае трубопроводных систем большой протяженности и существенно низких отрицательных температур, для поддержания требуемых режимов транспортировки нефти может потребоваться достаточно большая толщина теплоизоляции трубопроводов. В этом случае может быть поставлена задача экономии теплоизолирующего материала. В рамках рассматриваемой постановки ищется оптимальное распределение теплоизолирующего материала переменной толщины по длине трубопровода, при котором достигается максимальная экономия теплоизолирующего материала при соблюдении требований на режим транспортировки нефти в условиях экстремальных температур внешней среды.

Установленные закономерности позволяют разрабатывать эффективные теплоизоляционные покрытия, обеспечивающие достижение оптимальных режимов функционирования трубопроводных систем большой протяженности в условиях значительных перепадов температур окружающей среды, а также эффективно оптимизировать расход теплоизоляционного материала.

**Список литературы.**

1. Айнбиндер А.Б. Расчет магистральных промысловых трубопроводов на прочность и устойчивость. М.: Недра, 1991. 287 с.
2. Галиуллин З.Т., Леонтьев Е.В. Интенсификация магистрального транспорта газа. М.: Недра, 1991.-272 с.
3. Харионовский В.В. Надежность и ресурс конструкций газопроводов. М.: Недра, 2000.-467 с.
4. Шаммазов А.М. Расчет и обеспечение прочности трубопроводов, т. 1, 2, М.: Недра, 2006.
5. Завойчинский Б.И. Долговечность магистральных и технологических трубопроводов. Теория, методы расчета, проектирование. М.: Недра, 1992.
6. Зайнуллин Р.С. Ресурс элементов трубопроводных систем, Уфа, 2005.-836 с.
7. Азметов Х.А. Анализ напряженного состояния подземных трубопроводов// Трубопроводный транспорт нефти, 1999, № 1, с. 40-42.
8. Гусейнзаде М.А. Математические модели волнового течения в сложной трубопроводной системе. М.: Нефть и газ, 1989.
9. Рекач Ф.В. Расчет допустимых динамических нагрузок на трубопровод// Строительная механика инженерных конструкций и сооружений, 2008, № 1, с. 62-63.
10. Балышев О.А., Таиров Э.А. Анализ переходных и стационарных процессов в трубопроводных системах. Н.:Наука, 1998. -164 с.
11. Темпель Ф.Г. Моделирование газоснабжающих систем. Л.:Недра, 1986.
12. Лурье М.В. Математическое моделирование процессов трубопроводного транспорта нефти, нефтепродуктов и газа М.: Нефть и газ, 2003. -336 с.
13. Богомольный В.М. Оптимальное проектирование оболочек машин, трубопроводов, агрегатов. М.:МГУС, 2003. 223 с.
14. Рекомендации по расчету трубопроводов из многослойных труб на динамические нагрузки. М.:ВНИИСТ, 1982.
15. Борисов Б.И. Защитная прочность изоляционных покрытий подземных трубопроводов. М.: Недра, 1987.
16. Гусев Е.Л. Качественные закономерности взаимосвязи параметров в оптимальных структурах в задачах оптимального синтеза неоднородных структур из дискретного набора материалов при волновых воздействиях //Доклады РАН, 1996, т.346, № 3, с. 324-326.
17. Гусев Е.Л. Качественные закономерности структуры оптимальных решений в задачах оптимального синтеза многослойных конструкций при воздействии упругих волн//Доклады РАН,1998, т. 368, № 1, с.53-56.
18. Гусев Е.Л., Бакулин В.Н., Марков В.Г. Оптимальное проектирование конструкций из композиционных и традиционных материалов. М.: Наука-Физматлит, 2008.-256 с.
19. Термогидродинамика систем транспорта. Новосибирск: Наука, 1988.

Надійшла до редакції 07.06.2014

**Гусев Е.Л.**

**РОЗРОБКА І ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДІВ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ДЛЯ ВИРІШЕННЯ ЗАВДАНЬ ОПТИМІЗАЦІЇ СТРУКТУРИ ТРУБОПРОВІДНИХ СИСТЕМ ПРИ ДІЇ ЕКСТРЕМАЛЬНИХ ФАКТОРІВ ЗОВНІШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА**

*В останні десятиліття, у зв'язку з розробкою нових композиційних матеріалів з широким розмаїттям фізико - механічних і хімічних властивостей виникає проблема розробки фізичної та геометричної стру-*

ктури трубопровідних систем, які забезпечують найбільш ефективний режим транспорту в умовах екстремальних чинників зовнішнього середовища. Показано, що в умовах екстремальних чинників зовнішнього середовища, фізико-механічна і геометрична структура неоднорідних композиційних покриттів трубопровідних систем робить істотний вплив на режими транспортування. Відповідно до цього в умовах дії екстремальних факторів зовнішнього середовища розробка структурно-неоднорідних покриттів з композиційних матеріалів може дозволити створювати композиції, що одночасно поєднують високі хімічні та фізико - механічні властивості, що не досяжні для однорідних покриттів. Спрямований вибір фізичної та геометричної структури покриттів з композиційних матеріалів дозволяє досягти істотного синергетичного ефекта в поліпшенні властивостей неоднорідних покриттів порівняно з однорідними.

Для сформульованих багатокритеріальних задач оптимального проектування фізичної та геометричної структури трубопровідних систем, що забезпечують найбільш ефективний режим транспортування, були сформульовані ефективні методи рішення даної задачі, як задачі оптимізації з одним критерієм, розглянуті найбільш важливі постановки багатокритеріальних задач оптимального проектування фізичної і геометричної структури трубопроводних систем, в яких може бути виділений основний, основоположний критерій. Запропоновано найбільш ефективні методи вирішення такого класу задач.

**Ключові слова:** оптимальна конструкція, композитні матеріали, методи оптимізації, необхідний стан оптимальності, оптимальної структури композиційних побудов, системи труб, структурно-неоднорідні покриття.

**E. Gusev**

#### **DEVELOPMENT AND APPLICATION OF MATHEMATICS MODELING FOR SOLVING OPTIMIZATION PROBLEMS STRUCTURE OF PIPELINE SYSTEMS UNDER THE INFLUENCE EXTREME ENVIRONMENTAL FACTORS**

*In last decennial events, in connection with development new composite materials with broad variety physics-mechanical and chemical characteristics appears the problem of the development physical and geometrical structure pipe systems, providing the most efficient mode of the transport in condition extreme factor external medium. It is shown that in conditions of the extreme factors external medium, the physics-mechanical and geometrical structure of the inhomogeneous composite covering pipe systems renders the essential influence on the modes of the transportation. In accordance with this in condition of the action extreme factors external medium the development structurally inhomogeneous covering from the composite materials can allow to create to compositions, that simultaneous combine high chemical and physics-mechanical characteristic, not attainable for uniform covering.*

*For the formulated of the multicriterion problems of the optimum design of the physical and geometric structure pipe systems, providing the most effective mode of the transport, were worded efficient methods of the decision, offer the efficient ways information the given problem to problem of the optimization with one criterion, are considered the most important statement of the multicriterion problems of the optimum design of the physical and geometrical structure pipe systems TS, in which can be chosen main, fundamental criterion. The most efficient methods of the decision of such class of the problems are offered.*

**Key words:** Optimum design, composite constructions, methods optimisation, necessary condition optimality, variation statement, optimum structure of the composite constructions, pipe systems, structurally inhomogeneous coatings.