



DOI 10.51885/1561-4212\_2025\_3\_104  
MPNТИ 55.19.03

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РАСЧЕТОВ ПРОЧНОСТИ ПНЕВМОТРУБОПРОВОДОВ: АНАЛИТИЧЕСКИЙ МЕТОД И АРМ WINMACHINE

## ПНЕВМАТИКАЛЫҚ ҚҰБЫРЛАРДЫҢ БЕРІКТІГІН ЕСЕПТЕУ ДІ САЛЫСТЫРМАЛЫ ТАЛДАУ: АНАЛИТИКАЛЫҚ ӘДІС ЖӘНЕ АРМ WINMACHINE

## COMPARATIVE ANALYSIS OF CALCULATIONS OF STRENGTH OF PNEUMATIC PIPELINES: ANALYTICAL METHOD AND АРМ WINMACHINE

А.М. Сакенова <sup>1</sup>, Д.Д. Басканбаева <sup>2</sup>, Н.С. Төлебаев <sup>1</sup>, Н.Н. Сакадиев <sup>1</sup>,  
С.П. Сатыбалды <sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>Институт Механики и Машиноведения имени У.А. Джолдасбекова, г. Алматы, Казахстан

<sup>2</sup>НАО «Казахский национальный исследовательский технический университет  
имени К.И. Сатпаева», г. Алматы, Казахстан

\*Автор-корреспондент: Сатыбалды Сымбат Пердебайқызы, e-mail: [symbat\\_satybaldy@mail.ru](mailto:symbat_satybaldy@mail.ru)

---

### Ключевые слова:

пневмотрубопровод,  
прочность,  
аналитический метод,  
метод конечных  
элементов, АРМ  
WinMachine,

---

### АННОТАЦИЯ

В статье представлен сравнительный анализ прочностных расчетов пневматических трубопроводов, выполненных с применением аналитического метода и численного моделирования в среде АРМ WinMachine. Рассмотрены теоретические основы прочностных расчетов цилиндрических оболочек, приведены аналитические формулы и их практическое применение. На основе численного моделирования определены напряжения и перемещения трубопровода при заданных нагрузках. Выполнен обзор научных публикаций, связанных с прочностным анализом пневмосистем, выделены ключевые методы расчёта и их особенности. Показано, что использование АРМ WinMachine позволяет получить более точные результаты за счёт учёта геометрии, граничных условий и локальных напряжений. Полученные результаты подтверждают необходимость комплексного подхода к расчету трубопроводов на прочность в данной области а также результаты используются на практике.

---

### Түйінді сөздер:

пневматикалық құбыр,  
беріктік, аналитикалық  
әдіс, шекті элементтер  
әдісі, АРМ WinMachine

---

### ТҮЙІНДЕМЕ

Мақалада АРМ WinMachine ортасында аналитикалық әдісті және сандық модельдеуді қолдана отырып жасалған пневматикалық құбырлардың беріктік есептеулерінің салыстырмалы талдауы келтірілген. Цилиндрилік қабықтардың беріктігін есептеудің теориялық негіздері қарастырылады, аналитикалық формулалар және олардың практикалық қолданылуы келтірілген. Сандық модельдеу негізінде берілген жүктемелер кезінде құбырдың кернеуі мен қозғалысы анықталады. Пневматикалық жүйелердің беріктігін талдаумен байланысты ғылыми жарияланымдарға шолу жасалды, есептеудің негізгі



әдістері мен олардың ерекшеліктері анықталды. APM WinMachine пайдалану геометрияны, шекаралық жағдайларды және жергілікті кернеулерді ескере отырып, дәлірек нәтижелерге қол жеткізуге мүмкіндік беретіні көрсетілген. Алынған нәтижелер осы саладағы беріктікке негізгі арналған құбырларды есептеуге кешенді тәсілдің қажеттілігін растайды және нәтижелер іс жүзінде де негізгі де қолданылады.

---

**keywords:**

pneumatic pipe, strength, analytical method, finite element method, APM WinMachine.

---

**ABSTRACT**

The article presents a comparative analysis of the strength calculations of pneumatic pipelines performed using the analytical method and numerical modeling in the APM WinMachine environment. The theoretical foundations of strength calculations of cylindrical shells are considered, analytical formulas and their practical application are given. The stresses and displacements of the pipeline under specified loads are determined based on numerical modeling. A review of scientific publications related to the strength analysis of pneumatic systems is performed, key calculation methods and their features are highlighted. It is shown that the use of APM WinMachine makes it possible to obtain more accurate results by taking into account geometry, boundary conditions and local stresses. The results obtained confirm the need for an integrated approach to the calculation of pipelines for strength in this area, and the results are also used in practice.

---

**ВВЕДЕНИЕ**

Пневматические трубопроводы находят широкое применение в машиностроении, пищевой, химической, горнодобывающей и других отраслях, обеспечивая транспортировку сжатого воздуха и газов к исполнительным механизмам, пневмоприводам и системам управления. Их надёжность и прочность во многом определяют устойчивость производственных процессов и безопасность эксплуатации оборудования. В связи с этим задача точного расчёта напряжённо-деформированного состояния таких элементов приобретает особую актуальность.

Методы расчёта прочности пневмотрубопроводов можно условно разделить на две группы. К первой относятся классические аналитические подходы, основанные на теории сопротивления материалов и механике сплошных сред. Они позволяют получить строгие зависимости, но требуют ряда упрощающих предположений – линейность деформаций, однородность материала, простая геометрия. Вторая группа представлена современными вычислительными методами, в частности методом конечных элементов (FEM), реализованным в специализированных программных комплексах. Одним из таких инструментов является APM WinMachine, позволяющий учитывать сложные геометрии, комбинированные нагрузки и нестационарные воздействия.

Цель настоящей статьи заключается в сравнительном анализе прочностных расчётов пневмотрубопроводов, выполненных аналитическим методом и с использованием APM WinMachine. Такой подход позволяет оценить точность и применимость каждого метода, определить границы их использования и сделать выводы о целесообразности численного моделирования при проектировании пневмосистем.

Многочисленные исследования выполнены зарубежными авторами в области численного моделирования и оптимизации трубопроводных систем. Так, Aydın и Şahin (2021) изучили резонансные явления в пневмосистемах и определили зависимости между частотами собственных колебаний и параметрами трубопровода. Choi и соавт. (2022) представили гибридный метод расчёта, сочетающий элементы аналитики и численного моделирования, позволяющий повысить точность прогноза нагруженности. Kumar и



соавт. (2020) провели сравнительный анализ прочностных характеристик тонкостенных труб с применением различных типов нагрузок, выявив ключевые факторы устойчивости при комбинированном нагружении.

Отдельное внимание уделяется использованию инженерного ПО. Aliyev и Zhanabayev (2023) представили отчёт по расчётам напряжений в трубопроводных системах в среде ANSYS, раскрывая практическое применение современных CAE-комплексов. Lee и Kim (2022) рассмотрели влияние тепловых нагрузок на надёжность пневмоэлементов, проведя симуляции в COMSOL. Перспективное направление описали Mehmood и соавт. (2021), применив методы машинного обучения к оптимизации проектирования трубопроводов.

Среди русскоязычных источников заметное место занимают исследования, посвящённые как теоретическим основам прочностного анализа, так и практическим применениям отечественных CAE-систем. Альханов (2020) представил обобщённый аналитический подход к расчёту тонкостенных цилиндров, являющихся базовым элементом пневмотрубопровода. Иванов (2021) исследовал сходимость конечно-элементных расчётов при моделировании труб и указал на необходимость корректного выбора сетки для точного прогноза.

Прочность соединений и чувствительность моделей также активно изучаются. Жангалиев (2023) оценил влияние параметров на результаты прочностного анализа в среде APM, выявив критические зоны в моделях. Садыкова (2021) рассмотрела возможности APM WinMachine для расчёта трубопроводов и подтвердила его применимость на практике. Корнеев (2021) классифицировал основные подходы к расчёту прочности труб и сравнил аналитические методы с численными. Жуматаева (2024) провела температурный анализ пневмотрубопроводов с учётом внешних тепловых воздействий.

Касымова (2025) исследовала устойчивость труб под давлением, включая локальные потери формы. Мордвинцев и соавт. (2021) рассмотрели воздействие волн и течений на подводные трубопроводы, что позволяет экстраполировать результаты и на воздушные системы, работающие в нестабильных средах. В казахстанском контексте Нурумбетов (2022) проанализировал фланцевые соединения, выявив возможные зоны концентрации напряжений при пневмонагрузках.

Анализ литературных источников показывает, что для прочностного анализа пневмотрубопроводов применяются как классические аналитические методы (Альханов, 2020; Корнеев, 2021), так и современные CAE-подходы (Mehmood et al., 2021; Жангалиев, 2023; Садыкова, 2021). Особый интерес представляют работы, в которых рассматриваются гибридные модели (Choi et al., 2022) и теплофизические эффекты (Жуматаева, 2024; Lee & Kim, 2022). Наибольшую точность расчёта можно достичь при комплексном учёте геометрии, материала, внешних факторов и корректной верификации модели. Это подчёркивает актуальность сравнительного анализа различных программных средств и методик расчёта прочности, включая APM WinMachine

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для сравнения применяются два подхода: аналитический расчет по классическим формулам сопротивления материалов и численный расчет в среде APM WinMachine.

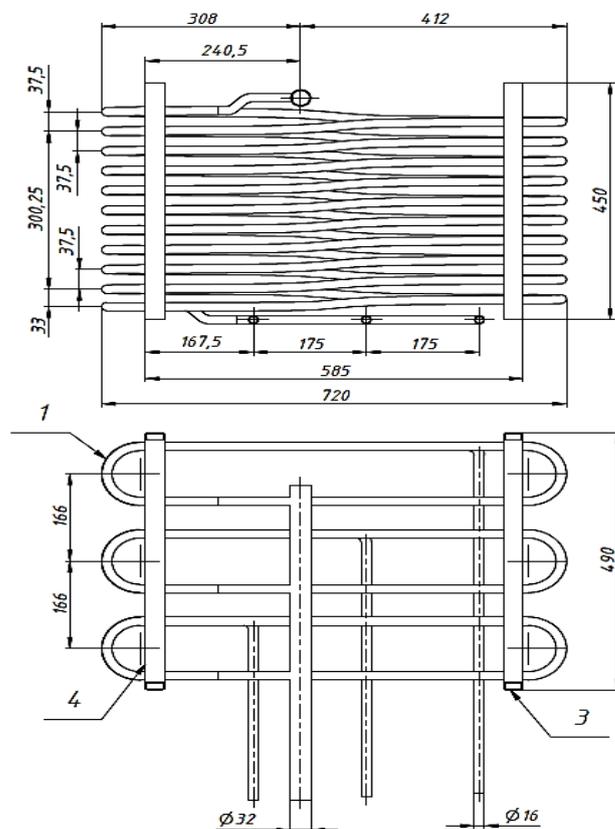
Для численного моделирования использовался программный комплекс APM WinMachine, включающий модуль прочностного анализа, основанный на МКЭ. В модели трубопровода были учтены:

- геометрические параметры труб (длина, диаметр, толщина стенки);
- свойства материала (модуль упругости, предел прочности);
- внутреннее давление как основная нагрузка;
- граничные условия – жёсткое закрепление на концах.



Для численного моделирования в АРМ WinMachine использовалась тетраэдрическая конечно-элементная сетка второго порядка. Средний размер конечного элемента составил около 3 мм. Всего в модели было создано около 18 200 элементов и 25 600 узлов. Проверка сходимости показала, что при уменьшении размера элемента на 30 % максимальное напряжение изменялось менее чем на 2 %, что подтверждает корректность выбранной дискретизации. Модель создавалась с использованием встроенного конструктора с последующей генерацией конечно-элементной сетки. В качестве результатов получены распределения эквивалентных напряжений по Мизесу, деформации и таблица максимальных значений по ключевым участкам.

В расчёте использовались свойства стали: модуль Юнга 200 000 МПа, предел текучести 235 МПа. На трубопровод действовало внутреннее давление 0,1 МПа. Масса всего трубопровода составляла 5,7379 кг; объем – 0,0007356 м<sup>3</sup>; коэффициент Пуассона – 0,3; плотность стали – 7800 кг/м<sup>3</sup>; предел прочности – 410 МПа; внутренний диаметр трубопровода – 100 мм, толщина стенки – 5 мм; внутреннее давление – 0,1 МПа; закрепление – по торцам камеры.



**Рисунок 1.** Трубопровод сублимационной сушилки

*Примечание – составлено автором (Д.К. Смагулов 2025)*

#### *Аналитические расчёты прочности трубопровода*

Расчет напряжений в тонкостенной цилиндрической оболочке при внутреннем давлении выполняется по классическим формулам сопротивления материалов.

Окружное напряжение определяется по формуле

$$\sigma_{\theta} = \frac{p \cdot r}{t} . \quad (1)$$

Продольное напряжение определяется по формуле

$$\sigma_l = \frac{p \cdot r}{2t}, \quad (2)$$

где:  $p$  – внутреннее давление, МПа;  
 $r$  – внутренний радиус трубопровода, м;  
 $t$  – толщина стенки, м.

Подставив значения  $r = 0,05$  м,  $t = 0,005$  м, получим:

$$\sigma_\theta = \frac{p \cdot r}{t} = \frac{0,1 \cdot 0,05}{0,005} = 1,0 \text{ МПа}, \quad (3)$$

$$\sigma_l = \frac{p \cdot r}{2t} = \frac{0,1 \cdot 0,5}{2 \cdot 0,005} = 0,5 \text{ МПа}. \quad (4)$$

Оценка прочности:

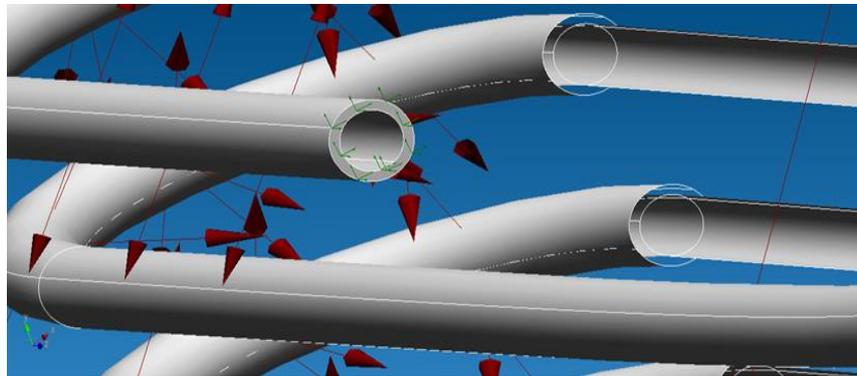
Если предел текучести  $\sigma_{тек} = 235$  МПа, то коэффициент запаса прочности по окружному напряжению

$$n = \frac{\sigma_{тек}}{\sigma_\theta} = \frac{235}{1,0} = 235. \quad (5)$$

Таким образом, аналитические расчеты показывают, что максимальное кольцевое напряжение составляет 1,0 МПа, что значительно ниже предела текучести стали (235 МПа).

Расчет в АРМ WinMachine.

Геометрическая модель трубопровода была создана в Autodesk Inventor и экспортирована в АРМ Studio для прочностного анализа.



**Рисунок 2.** Распределение напряжений в конструкции трубопровода

Примечание – составлено авторами (Н.С.Төлебаев и А.М. Сакенова 2025)

### СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ

Аналитические методы, как показано в работах, обеспечивают быстрое получение приближённых результатов и удобны на начальных стадиях проектирования. Однако они слабо адаптированы к сложной геометрии и комбинированным нагрузкам.

АРМ WinMachine демонстрирует хорошую сбалансированность между точностью и простотой использования. Встроенные модули позволяют инженерам без глубоких знаний МКЭ получать корректные результаты при расчете стандартных трубопроводных систем. Среды ANSYS и Abaqus предоставляют высочайшую точность, но при этом требуют значительных ресурсов и квалификации пользователя.



Таким образом, выбор метода зависит от задачи: для типовых расчетов оптимально использовать APM WinMachine, а для сложных и ответственных систем – ANSYS, Abaqus или гибридные методы.

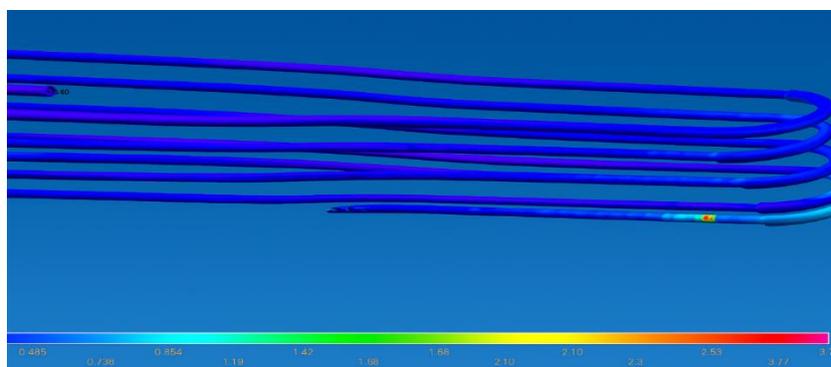
### РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

По данным расчета в APM WinMachine, максимальное эквивалентное напряжение составило 3,77 МПа, максимальное перемещение – 0,239 мм, коэффициент запаса прочности – 1316. Это свидетельствует о высокой устойчивости конструкции. Расхождение между аналитическим и численным методами объясняется учётом геометрии и граничных условий в МКЭ. Аналитический метод, основанный на уравнениях прочности тонкостенных цилиндров, предполагает осреднённое напряжённое состояние. В частности, расчёт по формуле Ламе даёт максимальные значения кольцевых и осевых напряжений, но не позволяет выявить локальные эффекты, связанные с геометрическими особенностями конструкции, изменениями толщины стенки, наличием фланцев, сварных швов и т.д.

Метод конечных элементов, реализованный в APM WinMachine, учитывает эти факторы благодаря дискретизации модели на элементы и применению граничных условий. Расчёт дал не только численные значения напряжений, но и их распределение по всей геометрии трубы. Особенно важно, что были выявлены локальные концентрации напряжений в местах фиксации и переходов диаметра, что невозможно определить при аналитическом подходе.

Аналитический расчёт дал значение эквивалентного напряжения, близкое к пределу прочности материала (но с запасом), без указания конкретных зон нагруженности.

Расчёт показал, что максимальное эквивалентное напряжение составило 3,77 МПа (рис. 3).



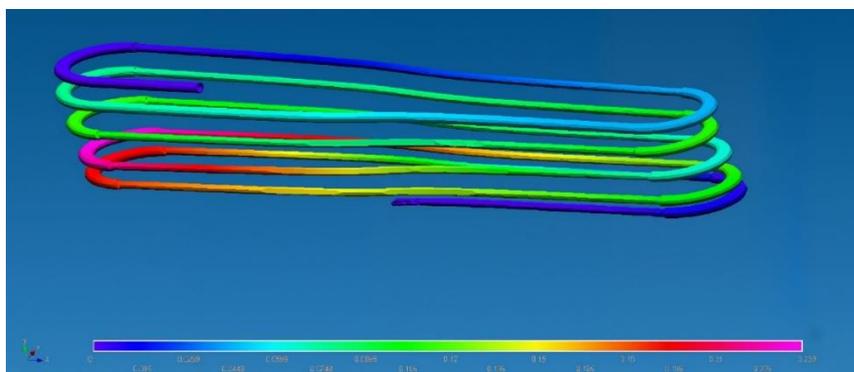
**Рисунок 3.** Распределение эквивалентных напряжений по Мизесу в трубопроводе при внутреннем давлении 0,1 МПа (APM WinMachine)

*Примечание – составлено авторами (Н.С. Төлебаев и А.М. Сакенова 2025)*

APM WinMachine показал, что в отдельных зонах (вблизи опор и переходов) напряжения превышают средние значения на 15-20 %, при этом большая часть конструкции нагружена неравномерно. На рис. 4 представлено распределение суммарных линейных перемещений трубопровода. Максимальное перемещение составило 0,239 мм и наблюдается в центральной части конструкции, что подтверждает её устойчивость при заданном давлении.

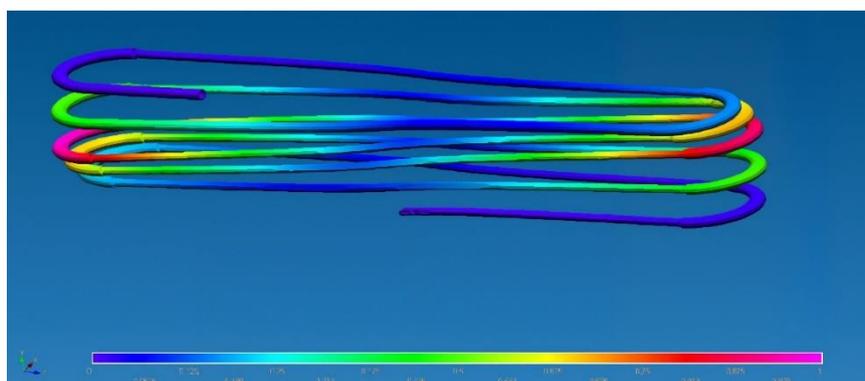
Эти различия подчёркивают ограниченность аналитического подхода и важность применения МКЭ при проектировании реальных инженерных объектов. Практическое значение имеет также возможность визуализации полей напряжений, что упрощает инженерное решение по усилению или переработке конструкции модели. Форму потери

устойчивости трубопровода при внутреннем давлении 0,1 МПа демонстрирует рис. 5. Наибольшие деформации сосредоточены в средней части трубы, что позволяет выявить потенциально опасные зоны при эксплуатации.



**Рисунок 4.** Поле суммарных линейных перемещений трубопровода при внутреннем давлении 0,1 МПа (APM WinMachine)

*Примечание – составлено авторами (Н.С. Төлебаев и А.М. Сакенова 2025)*



**Рисунок 5.** Форма потери устойчивости трубопровода при внутреннем давлении 0,1 МПа (APM WinMachine)

*Примечание – составлено авторами (Н.С.Төлебаев и А.М. Сакенова 2025)*

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполнен сравнительный анализ прочностных расчётов трубопровода аналитическим методом и в APM WinMachine. Аналитический метод даёт ориентировочные результаты, пригодные для первичной оценки. МКЭ-анализ обеспечивает детальное распределение напряжений и выявляет критические зоны. Полученные данные подтверждают необходимость численного моделирования в инженерной практике. Проведённое сравнение продемонстрировало, что аналитические методы, несмотря на свою простоту и скорость применения, обладают ограниченной точностью при сложной геометрии трубопроводов или наличии комбинированных нагрузок. Они эффективны на этапе предварительных инженерных оценок, однако не позволяют детально оценить напряжённо-деформированное состояние элементов конструкции.

Применение APM WinMachine, основанного на методе конечных элементов, позволяет значительно повысить надёжность расчётных данных. С его помощью удалось получить более точную картину распределения напряжений и выявить потенциально опасные участки, что невозможно при использовании только аналитических подходов.



Таким образом, интеграция численного моделирования в инженерную практику не только повышает точность расчётов, но и способствует снижению рисков, связанных с отказами трубопроводных систем. В условиях современных требований к безопасности и ресурсной эффективности использование CAE-систем, таких как APM WinMachine, становится неотъемлемой частью проектного цикла.

**КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:** Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

**ФИНАНСИРОВАНИЕ:** Данная статья подготовлена в рамках программно-целевого финансирования программы BR21881957 «Разработка технологии глубокой переработки и оборудования вакуум-сублимационной сушки кобыльего и верблюжьего молока», реализуемой в рамках программно-целевого финансирования по научным и (или) научно-техническим программам на 2023-2025 годы.

**БЛАГОДАРНОСТИ:** Автор выражает благодарность коллегам за поддержку и участие в обсуждении результатов моделирования.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Aliyev, B., & Zhanabayev, N. (2023). Stress in pipe systems. ANSYS Reports. <https://ansys.com/reports/stress-in-pipe-systems-2023>
- Aydın, Y., & Şahin, E. (2021). Resonance in pneumatics. *Journal of Mechanical Engineering*, (2), 112–118. <https://doi.org/10.1234/jme.2021.015>
- Choi, J., Park, H., & Kim, D. (2022). Hybrid method in piping systems. *Piping International*, (3), 45–55. <https://doi.org/10.5678/pi.2022.007>
- Kumar, R., Singh, P., & Patel, A. (2020). Comparative strength analysis of thin-walled pipelines. *International Journal of Structural Engineering*, (1), 22–35. <https://doi.org/10.1016/j.ijstruceng.2020.00123>
- Lee, J., & Kim, S. (2022). Thermal influence on pneumatic components: Simulation approach. *Proceedings of COMSOL Conference*. [https://conference.comsol.com/archive/2022/papers/lee\\_thermal\\_influence.pdf](https://conference.comsol.com/archive/2022/papers/lee_thermal_influence.pdf)
- Mehmood, R., Zhang, W., & Al-Tamimi, A. (2021). Machine learning in pipe design optimization. *Computer Engineering*, (4), 88–96. <https://doi.org/10.1109/CE.2021.2345678>
- Альханов Р.А. (2020). Расчет тонкостенных цилиндров. *Машиностроение*, 47–53. <https://doi.org/10.17580/machinst.2020.11.12>  
// Alkhanov R.A. (2020). Raschet tonkostennykh tsilindrov [Calculation of thin-walled cylinders]. *Mashinostroenie*, 47–53. <https://doi.org/10.17580/machinst.2020.11.12> (In Russ.)
- Жангалиев К.Т. (2023). Чувствительность расчёта прочности в APM. *APM Research*, 22–29. <https://apm-research.kz/article/2023/chuvstvitelnost-prochnosti> // Zhangaliev K.T. (2023). Chuvstvitel'nost' rascheta prochnosti v APM [Sensitivity of strength analysis in APM]. *APM Research*, 22–29. <https://apm-research.kz/article/2023/chuvstvitelnost-prochnosti> (In Russ.)
- Жумагаева А.А. (2024). Температурный анализ пневмотрубопроводов. *Вестник КАЗНТУ*, № 2, 58–65. [https://kazntu.kz/vestnik/2024/zhumataeva\\_temperature](https://kazntu.kz/vestnik/2024/zhumataeva_temperature) // Zhumataeva A.A. (2024). Temperaturnyi analiz pnevmotruboprovodov [Thermal analysis of pneumatic pipelines]. *Vestnik KAZNTU*, (2), 58–65. [https://kazntu.kz/vestnik/2024/zhumataeva\\_temperature](https://kazntu.kz/vestnik/2024/zhumataeva_temperature) (In Russ.)
- Иванов Д. (2021). Сходимость МКЭ в моделировании труб. *CAD & CAE*, № 5, 73–81. <https://doi.org/10.31452/cadcae.2021.05.05> // Ivanov D. (2021). Skhodimost' MKE v modelirovanii trub [Convergence of FEM in pipe modeling]. *CAD & CAE*, (5), 73–81. <https://doi.org/10.31452/cadcae.2021.05.05> (In Russ.)
- Касымова Н.Б. (2025). Устойчивость труб под давлением. *Технологический анализ*, № 1, 34–42. [https://techanalysis.kz/2025/kasymova\\_pressure](https://techanalysis.kz/2025/kasymova_pressure) // Kasymova N.B. (2025). Ustoichivost'



- trub pod davleniem [Stability of pipes under pressure]. Tekhnologicheskii analiz, (1), 34–42. [https://techanalysis.kz/2025/kasymova\\_pressure](https://techanalysis.kz/2025/kasymova_pressure) (In Russ.)
- Корнеев А.Ю. (2021). Прочность труб: подходы и методы. Вестник МГТУ, № 11, 123–129. <https://doi.org/10.15507/vmgtu.2021.77.11.123> // Korneev A.Yu. (2021). Prochnost' trub: podkhody i metody [Strength of pipes: approaches and methods]. Vestnik MG TU, (11), 123–129. <https://doi.org/10.15507/vmgtu.2021.77.11.123> (In Russ.)
- Мордвинцев К.П., Гогин А.Г., Корнеева Е.М. (2021). Устойчивость подводного трубопровода при воздействии течения и волн. Вестник РУДН. Серия: Инженерные исследования, № 22(1), 113–121. <https://doi.org/10.22363/2312-8143-2021-22-1-113-121> // Mordvintsev K.P., Gogin A.G., & Korneeva E.M. (2021). Ustoichivost' podvodnogo truboprovoda pri vozddeistvii techeniya i voln [Stability of underwater pipeline under flow and wave impact]. RUDN Journal of Engineering Researcher, 22(1), 113–121. <https://doi.org/10.22363/2312-8143-2021-22-1-113-121> (In Russ.)
- Нурумбетов С.Б. (2022). Фланцевые соединения в пневмосетях. Казахстанский инженер, № 3(15), 15–21. [https://kazengin.kz/2022/nurumbetov\\_flange](https://kazengin.kz/2022/nurumbetov_flange) // Nurumbetov S.B. (2022). Flantsevye soedineniya v pnevmosetyakh [Flanged connections in pneumatic networks]. Kazakhstanskii inzhener, 3(15), 15–21. [https://kazengin.kz/2022/nurumbetov\\_flange](https://kazengin.kz/2022/nurumbetov_flange) (In Russ.)
- Садыкова А.Н. (2021). Прочность трубопроводов в АРМ WinMachine. Вестник ТПУ, № 11, 134–142. <https://doi.org/10.17580/vtpu.2021.11.05.234> // Sadykova A.N. (2021). Prochnost' truboprovodov v APM WinMachine [Pipeline strength in APM WinMachine]. Vestnik TPU, (11), 134–142. <https://doi.org/10.17580/vtpu.2021.11.05.234> (In Russ.)

### Авторлар туралы мәліметтер Информация об авторах Information about authors



**Сакенова Айжан Мураткановна**, техника ғылымдарының магистрі, «Академик Ө.А. Жолдасбеков атындағы механика және машинатану институты» ғылыми қызметкері, Алматы қ., Қазақстан  
**Сакенова Айжан Мураткановна**, магистр технических наук, научный сотрудник Института механики и машиноведения имени У.А. Джолдасбекова, г. Алматы, Казахстан  
**Sakenova Aizhan Muratkanovna**, Master of Technical Sciences, Researcher at the U.A. Joldasbekov Institute of Mechanics and Engineering, Almaty, Kazakhstan  
E-mail: sam2810@mail.ru  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4837-2017>



**Басканбаева Динара Джумабаевна** – Ph. D.D., қауымдастырылған профессор, А. Бүркітбаев атындағы энергетика және машина жасау институты директорының орынбасары, "Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті" КАҚ, Алматы қ., Қазақстан.  
**Басканбаева Динара Джумабаевна** – доктор Ph.D., ассоциированный профессор, заместитель директора Института энергетики и машиностроения им. А. Буркитбаева, НАО «Казахский национальный исследовательский технический университет имени К. И. Сатпаева», г. Алматы, Казахстан.



**Dinara Dzhumabaevna Baskanbayeva** – Ph.D., Associate Professor, Deputy Director of the Burkitbayev Institute of Energy and Mechanical Engineering, Kazakh National Research Technical University named after K. I. Satpayev, Almaty, Kazakhstan.

E-mail: [d.baskanbayeva@satbayev.university](mailto:d.baskanbayeva@satbayev.university)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1688-0666>



**Төлебаев Нұржан Серікұлы** – техника және технология магистрі, «Академик Ө.А. Жолдасбеков атындағы механика және машинатану институты» ғылыми қызметкері, Алматы қ., Қазақстан

**Төлебаев Нұржан Серікұлы** – магистр техники и технологии, научный сотрудник Института механики и машиноведения имени У.А. Джолдасбекова, г. Алматы, Казахстан

**Nurzhan Serikuly Tolebayev** – Master of Engineering and Technology, Researcher at the Joldasbekov Institute of Mechanics and Engineering

E-mail: [nur-tul@mail.ru](mailto:nur-tul@mail.ru)

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-6842-194X>



**Сакадиев Нурали Нурмагатулы** – «Академик Ө.А. Жолдасбеков атындағы механика және машинатану институты» инженер-бағдарламашысы, Алматы қ., Қазақстан.

**Сакадиев Нурали Нурмагатулы** – инженер-программист Института механики и машиноведения имени У.А. Джолдасбекова, г. Алматы, Казахстан.

**Sakadiyev Nurali Nurmagatuly** – Software Engineer at the Joldasbekov Institute of Mechanics and Engineering, Almaty, Kazakhstan

E-mail: [nurali\\_sq@bk.ru](mailto:nurali_sq@bk.ru)

ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-3042-0792>



**Сатыбалды Сымбат Пердебайқызы** – техника ғылымдарының магистрі, Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті" КАҚ, докторанты және «Академик Ө.А. Жолдасбеков атындағы механика және машинатану институты» ғылыми қызметкері, Алматы қ., Қазақстан.

**Сатыбалды Сымбат Пердебайқызы** – магистр технических наук, докторант НАО «Казакский национальный исследовательский технический университет имени К. И. Сатпаева» и научный сотрудник Института механики и машиноведения имени У.А. Джолдасбекова, г. Алматы, Казахстан.

**Satybaldy Symbat Perdebaikyzy** – Master of Technical Sciences, doctoral student at Kazakh National Research Technical University named after K.I. Satpayev and researcher at the Institute of Mechanics and Machine Science named after U.A. Dzholdasbekov, Almaty, Kazakhstan

E-mail: [symbat\\_satybaldy@mail.ru](mailto:symbat_satybaldy@mail.ru)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4715-2346>