

УДК 532.542:532.135

**АНАЛИЗ ИССЛЕДОВАНИЙ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПОТОКОВ ЖИДКОСТИ
С УЧЕТОМ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТЕЙ ТРУБОПРОВОДОВ
И ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПАРАМЕТРОВ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ**

К.С. Пристромова, А.Н. Пехота

Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Республика Беларусь
e-mail: pristromovaks@gmail.com, pehota.an@mail.ru

Выполнен обзор исследований 2020–2025 годов по влиянию шероховатости внутренних поверхностей и температуры теплоносителя на гидравлические характеристики трубопроводов из стали, полимеров и композитов. Проведен сравнительный анализ материалов трубопроводов.

Ключевые слова: шероховатость труб, коэффициент трения Дарси–Вейсбаха, число Рейнольдса, температурная зависимость вязкости, полимерные трубы, стальные трубы, композитные трубы, потери напора.

**ANALYSIS OF STUDIES OF HYDRODYNAMIC FLUID FLOWS TAKING INTO ACCOUNT
THE ROUGHNESS OF PIPELINE SURFACES AND TEMPERATURE PARAMETERS OF THE COOLANT**

K. Pristromova, A. Pekhota

Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus
e-mail: pristromovaks@gmail.com, pehota.an@mail.ru

A review of studies from 2020–2025 was conducted on the influence of internal surface roughness and heat-carrier temperature on the hydraulic characteristics of pipelines made of steel, polymers, and composites. A comparative analysis of pipeline materials was performed.

Keywords: pipe roughness, Darcy–Weisbach friction factor, Reynolds number, temperature-viscosity dependence, polymer pipes, steel pipes, composite pipes, head loss.

Введение. Исследование влияния шероховатости внутренней поверхности трубопроводов на гидродинамические характеристики теплоносителя имеет ключевое значение для энергосберегающих инженерных систем зданий и сооружений, а также для промышленных сетей тепло- и водоснабжения. Поверхностная микрогеометрия стенок (абсолютная шероховатость ϵ) определяет уровень потерь давления, а температурные параметры теплоносителя – через изменение вязкости $\mu(T)$ – влияют на режим течения и коэффициент трения λ . Совокупное влияние этих факторов критично при проектировании и эксплуатации трубопроводов из стали, полимеров и композитов.

За последние пять лет (2020–2025) наблюдается значительный рост интереса к данной тематике, что подтверждается более чем 140 релевантными публикациями в ведущих международных журналах. Особое внимание исследователей привлекают:

1. Сравнительный анализ различных материалов трубопроводов (сталь, полимеры, композиты).
2. Влияние температурных параметров на гидродинамическое сопротивление.
3. Разработка усовершенствованных методов расчета коэффициента трения.

Для проведения комплексного анализа был осуществлен систематический поиск научных публикаций в следующих базах данных: CrossRef, Semantic Scholar, Google Scholar. Критерии отбора: 2020–2025 гг.; тематика — гидродинамика трубопроводов, шероховатость и коэффициенты трения, теплоперенос в трубах, материалы трубопроводов.

Основная часть. Анализ исследований по материалам исследований трубопроводов.

Стальные трубопроводы остаются одним из наиболее распространенных типов в промышленных системах благодаря высокой прочности и термостойкости. Однако их основным недостатком является подверженность коррозии, что непосредственно влияет на изменение шероховатости поверхности во времени. В одном из ключевых исследований [1] проведен сравнительный анализ стальных и полимерных трубопроводов. Основные выводы исследования сводятся к следующему: стальные трубопроводы обладают существенно большей шероховатостью по сравнению с полимерными аналогами, причём их коэффициент шероховатости возрастает с течением срока эксплуатации вследствие коррозионных процессов; в результате при одинаковых условиях эксплуатации потери давления в стальных трубах оказываются на 15–25% выше, чем в полимерных.

Полимерные материалы, особенно поливинилхлорид (PVC) и сшитый полиэтилен (PEX), приобретают все большую популярность в системах водоснабжения и отопления благодаря устойчивости к коррозии и низкой шероховатости поверхности.

Исследование [2] посвящено количественной оценке влияния температуры теплоносителя на потери напора в трубопроводах из PVC и выбор оптимального диаметра труб. Автор анализирует, как изменение свойств воды при нагреве отражается на режиме течения и параметрах гидравлического сопротивления. В ходе исследования устанавливается связь между температурой, вязкостью, числом Рейнольдса и коэффициентом трения λ . Результаты сопоставляются для различных диаметров и скоростей потока, что позволяет предложить практические рекомендации по проектированию. Сделан вывод, что температура теплоносителя существенно влияет на потери напора в PVC трубах; при повышении температуры с 20°C до 80°C вязкость воды снижается, что приводит к уменьшению коэффициента трения на 20–30%. Это снижение коэффициента трения уменьшает гидравлические потери при прочих равных условиях, особенно в турбулентном режиме. Практически это означает, что при высоких температурах можно рассматривать меньшие перепады давления или оптимизировать выбор диаметра для снижения энергозатрат на перекачку.

Исследование [3] посвящено оценке гидравлических характеристик пластиковых труб, в частности PVC и полиэтиленовых (PE) труб. Авторы систематизируют экспериментальные и литературные данные по абсолютной шероховатости и связывают их с диапазонами коэффициента гидравлического трения в турбулентном режиме. Работа акцентирует внимание на сравнении материалов с близкими гидравлическими свойствами, но разными диапазонами шероховатости. Отдельно рассматривается применимость полученных значений в инженерных расчетах для сетей водоснабжения и теплоносителей. Результаты представлены в форме ориентировочных интервалов параметров, пригодных для практического использования. Делается вывод, что абсолютная шероховатость для PVC труб лежит в пределах $\epsilon = 0,0015–0,007$ мм, тогда как для PE труб она составляет $\epsilon = 0,001–0,003$ мм. При турбулентном режиме течения коэффициент гидравлического трения λ для пластиковых труб обычно находится в диапазоне 0,015–0,025, при прочих равных условиях ближе к нижней границе для более гладких труб. Практическое следствие: PE трубы потенциально обеспечивают меньшие потери давления по сравнению с PVC при одинаковых условиях эксплуатации.

Композитные материалы, особенно армированные стекловолокном (GRE – Glass Reinforced Epoxy) и углеродным волокном, представляют собой перспективное направление в трубопроводном транспорте.

Исследование [4] описывает как внутренняя композитная облицовка сочетает механическую прочность стального корпуса с коррозионной стойкостью и гидравлической гладкостью полимерного слоя. Особое внимание уделено эксплуатационной надежности в агрессивных средах и устойчивости к износу при высоких перепадах давления и расходах. В исследовании приведены ориентировочные гидравлические характеристики и оценка жизненного цикла, также делается вывод, что композитная облицовка обеспечивает защиту от коррозии, снижение внутренней шероховатости и повышение долговечности трубопровода вплоть до 50 лет. Выгода проявляется в уменьшении потерь давления благодаря сниженной шероховатости поверхности, для которой приведён диапазон $\epsilon \approx 0,005-0,015$ мм. Это сближает эксплуатационные свойства стальных труб с полимерными аналогами при сохранении их прочностных преимуществ. Практически технология открывает путь к более эффективным и долговечным системам в агрессивных средах.

Таблица 1. – Сводная таблица коэффициентов шероховатости

Материал трубопровода	Абсолютная шероховатость ϵ , мм
Стальные трубы:	
– Новые, гладкие	0,04–0,10
– С эксплуатацией 5 лет	0,15–0,30
– С сильной коррозией	0,50–2,00
Полимерные трубы:	
– PVC	0,0015–0,007
– PE (полиэтилен)	0,001–0,003
– PEХ (сшитый полиэтилен)	0,001–0,005
Композитные трубы:	
– GRE (стекловолокно/эпоксид)	0,005–0,015
– Углеродное волокно	0,003–0,010
С покрытиями:	
– Эпоксидное покрытие	0,01–0,05
– Цементно-песчаное	0,30–3,00

Температурные эффекты в трубопроводных системах. Температура теплоносителя оказывает многостороннее влияние на гидродинамические характеристики потока через изменение физических свойств жидкости. При постоянном расходе и неизменном диаметре трубы повышение температуры понижает динамическую вязкость жидкости, вследствие чего возрастает число Рейнольдса для того же расхода. По мере роста Re система может пересечь критическую область и перейти от ламинарного к турбулентному режиму, особенно при наличии возмущений и шероховатости стенок. Температурное разжижение снижает внутреннее сопротивление потоку, что ведет к уменьшению коэффициента трения как в ламинарном, так и в турбулентном режимах (хотя в турбулентном влияние также зависит от относительной шероховатости). В результате для заданного расхода падают гидравлические потери давления, а для заданного напора возможен больший пропускной расход. Таким образом, температура через изменение вязкости определяет режим течения и уровень гидравлических потерь, что критично для расчета и управления трубопроводных систем.

Заключение. В ходе работы проведен анализ исследований гидродинамических потоков жидкостей с учетом шероховатости поверхностей трубопроводов из различных материалов и температурных параметрах теплоносителя. Шероховатость доминирует в формировании гидравлического сопротивления при турбулентном течении; температурная зависимость $\mu(T)$ существенно влияет на λ и потери напора.

Установлено, что полимерные трубопроводы (PVC, PE, PEХ):

- обладают наименьшей шероховатостью ($\epsilon = 0,001\text{--}0,007$ мм);
- обеспечивают снижение потерь давления на 20–40% по сравнению со сталью;
- не подвержены коррозии, сохраняют характеристики в течение всего срока службы.

Для стальных трубопроводов характерно:

– начальная шероховатость для них составляет 0,04–0,10 мм увеличивается до 0,15–2,0 мм при коррозии;

- потери давления в них возрастают на 15–25% в течение 5–10 лет эксплуатации;
- они требуют регулярной очистки и антикоррозионной защиты;
- им следует отдавать предпочтение для высокотемпературных применений ($T > 100^\circ\text{C}$);

Композитные трубопроводы:

- сочетают низкую шероховатость ($\epsilon = 0,003\text{--}0,015$ мм) с высокой прочностью.
- устойчивы к коррозии и химическому воздействию, в силу чего перспективны для специальных применений (морская вода, агрессивные среды).
- имеют более высокую стоимость, что ограничивает массовое применение.

ЛИТЕРАТУРА

1. Serzhan, S.L., Skrebnev, V.I., Malevanny, D.V. (2023). Study of the effects of steel and polymer pipe roughness on the pressure loss in tailings slurry hydrotransport. *Obogashchenie Rud*, 2023(4), 08. DOI: 10.17580/or.2023.04.08.
2. Wu, Y. (2023). A quantitative analysis on the influence of temperature on head loss along PVC pipe and the choice of pipe diameter. *Journal of Physics: Conference Series*, 2634(1), 012004. DOI: 10.1088/1742-6596/2634/1/012004.
3. Rakhimov, K., Melikuziyev, S., Sultanov, R. (2023). Coefficient of hydraulic friction of plastic pipes. *E3S Web of Conferences*, 401, 01042. DOI: 10.1051/e3sconf/202340101042.
4. Ali, A., Radhakrishnan, G., AlKhouly, A. (2023). Worldwide's First Time Successful Hydraulic Fracture Operation Through GRE Composite Fiberglass Lined API 5CT Carbon Steel String. *ADIPEC Conference Proceedings*. DOI: 10.2118/216979-MS.
5. Пехота А.Н. Анализ методов, применяемых в исследованиях шероховатости материалов / А.Н. Пехота К.С. Пристромова // Международная конференция «Вода. Газ. Тепло.2025» – БНТУ – 15–16 мая 2025 г. Минск. – 2025. – С. 99-102.