



УДК 628.462

doi: 10.55287/22275398_2026_60_121

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ ВОДЫ В АППАРАТАХ С МЕШАЛКАМИ НА ПРЕДМЕТ ВЛИЯНИЯ НА ШЕРОХОВАТОСТЬ МАТЕРИАЛОВ СТЕНОК ТРУБОПРОВОДОВ

В. А. Орлов
С. П. Зоткин
М. А. Большакова

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет
(НИУ МГСУ), г. Москва

Аннотация

Представлены результаты исследований по моделированию тангенциального движения воды в малогабаритных аппаратах с магнитными мешалками в качестве альтернативы линейному течению воды в трубопроводах с помещением в них полимерных образцов внутренних защитных покрытий труб, используемых при бестраншейном ремонте инженерных сетей. Выявлены тенденции трансформации ряда химических показателей исходной водопроводной воды во времени в процессе добавления в нее хлора, а также изменения шероховатости образцов исследуемых полимерных материалов за счет инкрустации на их поверхности минеральных солей. В экспериментах по определению гидравлических показателей образцов использовались методы профилометрии и светоскопии, позволяющие выявить динамику изменения коэффициентов эквивалентного сопротивления K_z данных образцов. Расчетным путем определены коэффициенты гидравлического трения λ , удельного сопротивления A образцов защитных покрытий и проведен анализ изменения энергетических показателей при возможном использовании данных покрытий в практике бестраншейного ремонта трубопроводов.

Ключевые слова

Магнитные мешалки, трубопровод, защитные покрытия, шероховатость, химические показатели, инкрустация.

Дата поступления в редакцию
29.09.2026

Дата принятия к печати
02.10.2026

Введение

Задачей исследований являлась отработка предположения для использования мешалок по иному назначению: не для перемешивания содержимого, а создания и поддержания требуемых условий для тангенциального движения жидкости, имитирующего линейный поток воды в трубах.

В основе выдвинутого предложения было положено использование так называемого «насосного эффекта», т. е. способность мешалки транспортировать жидкость подобно насосу по периферии цилиндрического стеклянного сосуда определенных габаритов. Как известно, в зависимости от частоты

вращения якоря мешалок и их конструкции может превалировать один из типов движения: тангенциальное, радиальное и аксиальное. При проведении экспериментальных исследований должны создаваться условия для тангенциального типа движения, при котором жидкость за счет вращения якоря движется, в основном, вдоль стенок цилиндрического сосуда по концентрическим окружностям, параллельным плоскости вращения мешалки, и при этом скорость ее движения может подлежать расчету.

Одним из основных условий обеспечения тангенциального движения воды в мешалках без случайного перехода к радиальному или аксиальному является отсутствие на поверхности жидкости воронки, которая может расти с увеличением частоты вращения якоря. Таким образом, имитируя процесс линейного течения в замкнутом объеме при соответствующих условиях, представляется возможность оперативного отслеживания потенциальных изменений (трансформации) во времени ряда показателей, в частности, качественных характеристик воды при искусственном изменении ее химического состава и температуры, а также гидравлических показателей специальных малогабаритных образцов защитных покрытий труб, помещаемых в аппарат с мешалками.

Конечным итогом подобных исследований может являться поиск оптимальных значений шероховатости защитных покрытий, при которых наблюдается эффект энергосбережения при транспортировке воды по напорным трубопроводам.

Материалы и методы

Материалами для исследований является питьевая вода, в которую искусственно вводится хлор, и которая подлежит обработке в сосуде на магнитной мешалке в целях изучения процессов изменения ее химических показателей, а также фазовых состояний помещенных в воду образцов защитных покрытий [1 – 11].

Методом исследований служит моделирование тангенциального движения воды в сосуде, расположенном на платформе магнитной мешалки, с фиксацией возможной трансформации ряда качественных показателей воды, гидравлических характеристик образцов защитных покрытий труб и потребления электроэнергии в тангенциальном режиме движения жидкости, имитирующем линейное турбулентное течение воды в трубопроводе [12]. Это также соответствует задачам изучения ряда явлений в части выяснения роли химических и иных реакций, происходящих в процессах интенсивного перемешивания воды, т. е. в условиях турбулентного течения при наличии в ней образцов исследуемых материалов защитных покрытий с возможностью изучения изменения их свойств [13].

Выбор комплекса аппаратуры с использованием магнитной мешалки обусловлен рядом ее положительных факторов: магнитная мешалка может влиять на качество перемешивания жидкости, но при этом не оказывает воздействия на материал стенки сосуда, в частности, из стекла, которое не реагирует на магнитное поле, так как при работе бесконтактной магнитной мешалки с перемешивающей жидкостью взаимодействует лишь якорь из ферромагнетика с инертной оболочкой, который не воздействует создаваемым магнитным полем на воду и испытуемые образцы [14, 15].

Аппаратура для проведения экспериментов включала цилиндрический сосуд объемом 1 л воды из инертного материала (стекла), помещаемый на платформе магнитной мешалки с фторопластовым якорем. Диаметр сосуда составлял 10 см. Сверху сосуд закрывается герметичной пробкой из инертного материала, к которой крепится прямоугольный образец защитного покрытия трубопровода с таким условием, что он располагается у периферии стакана вблизи его стенки на соответствующем расстоянии от центра сосуда. Для определения качественных характеристик воды до и после искусственного введения в нее хлора использовался анализатор ЭКОСТАБ РС 233, с помощью которого выявлялись значения pH, минерализации (солесодержания), электропроводимости и температуры воды.

В экспериментах по определению гидравлических показателей стенок образцов использовались методы профилометрии и светоскопии, позволяющие выявить динамику изменения их коэффициентов эквивалентного сопротивления K_3 . Расчетным путем определялись коэффициенты гидравлического трения λ , удельного сопротивления A и энергетические показатели [16].

При проведении экспериментов на магнитной мешалке исследованию подлежали специально подготовленные твердые образцы широко распространенных напыляемых внутренних защитных покрытий (облицовок), в частности Subcote, имеющего гигиенический сертификат по возможности использования в системах питьевого водоснабжения [17]. Габариты образцов составляли $(2,0 \times 7,0)$, а их площадь контакта с потоком воды с учетом лицевой и тыльной сторон, а также боковых поверхностей 32 см^2 . Общий вид аппарата для исследований с описанными выше конструктивными элементами и водой (голубой цвет) представлен на **рис. 1**.

Таким образом, сущность проведенных исследований по оценке возможной трансформации шероховатости стенок образцов труб и параметров качества питьевой воды при использовании тангенциального движения в аппарате с мешалками фактически представляла собой альтернативу подобным длительным по времени экспериментам на реальных напорных трубопроводах большой протяженности при аналогичных условиях.

В качестве имитатора линейного течения рассматривался магистральный стальной трубопровод, на внутреннюю поверхность которого нанесен бестраншейным методом полимерный состав, который после полимеризации представляет собой тонкий слой твердого защитного материала, в данном случае в виде покрытия Subcote.

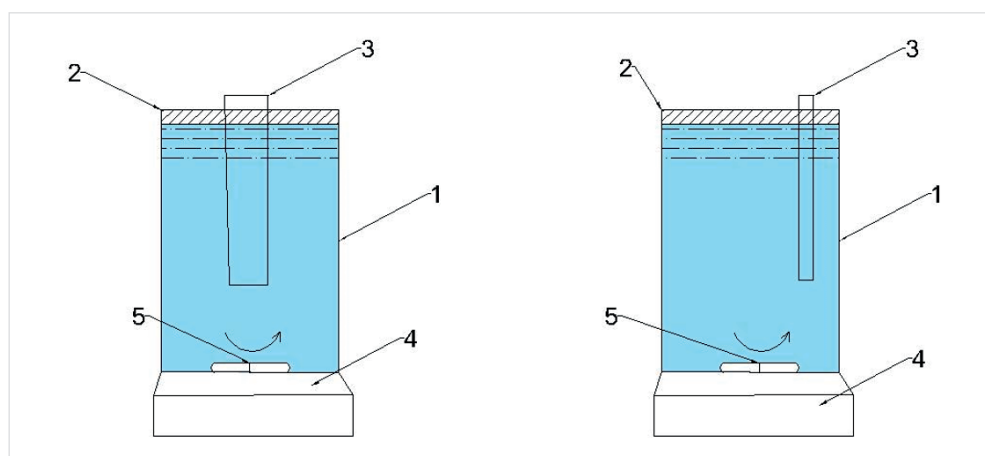


Рис. 1. Схема размещения элементов аппарата на магнитной мешалке (слева — лицевой вид образца в емкости; справа — вид образца с тыльной стороны): 1 — стеклянный стакан; 2 — резиновая пробка; 3 — образец определенного размера, подвешенный вблизи края стакана; 4 — магнитная мешалка; 5 — якорь

Диаметр трубопровода принят равным $d = 1200 \text{ мм}$ ($1,2 \text{ м}$; 120 см), протяженность $S = 10 \text{ км}$ (10000 м ; 1000000 см).

При этом предполагалось, что по трубопроводу транспортируется питьевая вода от водопроводных очистных сооружений до установленной (конечной) точки ее разбора. Остаточная концентрация хлора в исходной воде в начале трубопровода принималась равной $X = 0,5 \text{ мг/л}$, а средняя (линейная) скорость течения воды в трубопроводе $V = 1,0 \text{ м/с}$.

Время T контакта (пребывания) воды в трубопроводе при ее транспортировке от его начала до конца принимается равной (1):

$$T = S/V = 1\,000\,000 \text{ см} / 100 \text{ см/с} = 10\,000 \text{ с (или 167 мин; 2,78 ч).} \quad (1)$$

Площадь контакта стенки трубопровода с потоком составляет (2):

$$L = l \cdot S = (\pi \cdot d) \cdot S = (3,14 \cdot 120 \text{ см}) \cdot 1\,000\,000 \text{ см} = 376\,800\,000 \text{ см}^2. \quad (2)$$

где l — длина окружности по периметру трубы: $l = \pi \cdot d$ (см).

Расход воды Q в трубопроводе диаметром d составляет (3):

$$Q = (\pi \cdot d^2 \cdot V)/4 = (3,14 \cdot 1,2^2 \cdot 1)/4 = 1,1304 \text{ м}^3/\text{с (или } q = 1130,4 \text{ л/с).} \quad (3)$$

Общий объем W воды, прошедший от начальной до конечной точек на трубопроводе за время T составляет (4):

$$W = T \cdot q = 10\,000 \cdot 1130,4 = 11\,304\,000 \text{ л.} \quad (4)$$

Выбор указанных размеров образцов площадью 32 см^2 обусловлен необходимостью обеспечения приблизительно равных условий для потребления хлора во времени единицей поверхностей (1 см^2) образцов и площадью контакта потока воды в трубопроводе при ее транспортировке. Так, при объеме воды 1 л в стакане на 1 см^2 площади образца приходится $1/32 = 0,03125 \text{ л}$, а для трубопровода это соотношение составляет $Q \cdot T/L = 1130,4 \cdot 10\,000/376\,800\,000 = 0,03 \text{ л}$ на 1 см^2 площади контакта стенок трубопровода с водой.

Как указывалось выше, на данном этапе экспериментов с магнитной мешалкой исследовалось возможное потребление хлора, трансформация качественных показателей воды, в частности, солесодержания, а также изменение степени шероховатости прямоугольного образца защитного покрытия Subcote с указанными выше размерами.

Сущность экспериментов с размещенным образцом в сосуде образцами (*см. рис. 1*) и с заранее известной концентрацией введенного в воду и равномерно распределенному по всему ее хлора, состояла в запуске мешалки с соблюдением определенной угловой скорости ω (с пересчетом в линейную V) и обеспечения строго определенного времени контакта T .

Таким образом, по условиям задачи обеспечивались равное время контакта воды с образцом в стеклянном сосуде и в трубопроводе, одинаковые значения линейных скоростей ($1,0 \text{ м/с}$), а также отсутствие образования воронок на поверхности воды в сосуде, которые могут нарушить устанавливаемый режим работы магнитной мешалки для обеспечения требуемых тангенциальных скоростей.

Расчет габаритов стеклянного сосуда (колбы) с назначенным объемом $WW = 1 \text{ л (дм}^3\text{)}$ производился следующим образом:

- принимался диаметр стакана, например, $d_c = 1 \text{ дм (10 см)}$.
- определялась его высота l_c (в дм или см) из формулы с учетом объема стакана WW (в л или дм³):

$$WW = (\pi \cdot d_c^2 \cdot l_c)/4 = (3,14 \cdot 1^2 \cdot l_c)/4.$$

Отсюда, согласно расчету l_c должна составить $1,274 \text{ дм (12,74 см)}$.

Сверху стакана устанавливается герметичная пробка из инертного материала, к которой крепится образец с таким условием, что он располагается у периферии стакана на расстоянии $0,05 \text{ м (0,5 дм или 5 см)}$.

Угловая скорость при переводе в линейную вблизи вертикальных стенок стеклянного сосуда рассчитывалась с использованием онлайн-калькулятора по автоматизированной программе planetcalc.ru. Согласно расчету, требуемая скорость течения $V = 1,0 \text{ м/с}$ обеспечивалась при угловой $\omega = 191$ оборотов в минуту. В период проведения экспериментов фиксировались минерализация (мг/л) и электропроводность воды (мкСм/см).

Для приготовления соответствующей концентрации хлора $X = 0,5$ мг/л в воде сосуда в нее добавлялись таблетки для обеззараживания питьевой воды Хлортаб Аква, а концентрация исходного и остаточного хлора определялась по прибору ORP EC TDS. Также определялись исходное солесодержание, электропроводность и замерялась температура воды t (градусы Цельсия).

Как указывалось выше, процесс перемешивания (работы мешалки) длился в течение времени $T = 2,784$ ч (10 000 с; 167 мин), что соответствует пути, пройденному потоком воды по трубопроводу диаметром 1,2 м и протяженностью 10 км.

Методика экспериментов заключается в том, что по истечению установленного времени контакта T определяются следующие показатели:

- а) конечная концентрация остаточного хлора в воде цилиндрического стакана XK (мг/л) по прибору;
- б) ожидаемое расчетное (весовое) количество хлора WK (мг) в воде трубопровода, как результат возможного потребления его образцом или внутренней поверхностью трубопровода;
- в) ожидаемая концентрация «потерянного» хлора в воде в конечной точке трубопровода XP мг/л.

До и после проведения экспериментов с образцами по пунктам «а – в» фиксируются соответственно начальное $RA1$ среднеарифметическое отклонение профиля внутренней поверхности трубы от средней линии и конечное $RA2$ (методами светоскопии и профилометрии) в целях последующего расчета коэффициента эквивалентной шероховатости K_z и влияния изменения шероховатости на энергетические показатели работы трубопровода.

В экспериментах на перспективу предусматривается использование аналогичных опытных образцов повторно N -количество раз ($2,784 \text{ ч} \times N$) с применением той же методики, заполняя сосуд 1 л свежей водой с остаточной концентрацией хлора 0,5 мг/л и отслеживания динамики изменения величины шероховатости образцов с помощью профилометрии и светоскопии.

Результаты экспериментов и их интерпретация

Ниже в целях наглядности приведен пример одной из серии экспериментов по исследованию трансформации описанных выше химических показателей.

Остаточная величина хлора после пребывания его в сосуде с водой после обработке на магнитной мешалке в течение времени $T = 2,784$ ч составила $XK = 0,395$ мг/л.

Таким образом, образец площадью контакта 32 см^2 в воде объемом 1 л «потребил» $XKK = X - XK = 0,5 - 0,395 = 0,105$ мг хлора за 2,784 ч, а 1 см^2 находящегося образца в воде объемом 1 л «потребил» $XKK = (X - XK)/32 = (0,5 - 0,395)/32 = 0,00328$ мг.

Тогда, переходя к реальному трубопроводу с временем контакта воды в нем $T = 2,784$ ч (от начальной до конечной точки движения воды) и с площадью контакта $L = 376\,800\,000 \text{ см}^2$, внутренней стенкой трубопровода будет «потребляться» $WK = 376\,800\,000 \times 0,00328 = 1\,235\,904$ мг или 1 235 г.

Ожидаемая концентрация «потерянного» хлора в воде в конечной точке трубопровода XP мг/л определяется как:

$$XP = WK/W = 1\,235\,000/11\,304\,000 = 0,109 \text{ мг/л.}$$

В свою очередь, ожидаемая концентрация остаточного хлора XO в воде трубопровода в конечной точке составит:

$$XO = X - XP = 0,5 - 0,109 = 0,391 \text{ мг/л.}$$

Таким образом, разница между XK и XO незначительна и составляет 0,004 мг/л, т. е. порядка 1%. Это

доказывает возможность физической адекватности использования модели переноса результатов экспериментов в сосуде с мешалкой на реальный трубопровод.

Параллельно с проведением экспериментов с образцами по пунктам «а–в» (см. выше) фиксировались в целях последующего расчета коэффициента эквивалентной шероховатости K_3 и влияния изменения шероховатости на энергетические показатели работы трубопровода, соответственно, начальное $RA1$ среднеарифметическое отклонение профиля внутренней поверхности трубы от средней линии и конечное $RA2$ (методами светоскопии и профилометрии).

В период проведения описанных экспериментов также фиксировались величины минерализации (мг/л) и электропроводности воды (мкСм/см) как результат влияния наличия хлора и изменения (трансформации) гидравлических показателей образцов.

Таким образом, результатом представленных ниже экспериментов по моделированию тангенциального течения воды входила комплексная обработка полученных данных трансформации химических показателей воды и гидравлических характеристик образцов защитных с помощью профилометрии, светоскопии, а также энергетическим затратам на транспортировку, где наиболее полно представлены анализ и интерпретация полученных величин трансформации эквивалентной шероховатости K_3 образца из материала Subcote, расчетных коэффициентов гидравлического трения λ и динамики изменения энергетических показателей при транспортировке воды по трубопроводам.

На **рис. 2–4** представлены графики, иллюстрирующие динамику изменения указанных гидравлических и энергетических показателей, полученных при проведении экспериментов на условно холодной воде (20°C) с разными начальными концентрациями вводимого в воду хлора.

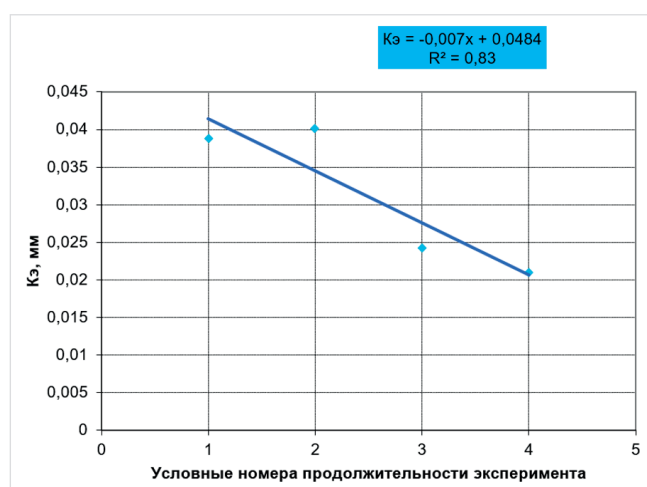


Рис. 2. График зависимости изменения коэффициента эквивалентной шероховатости K_3 (мм) в зависимости от продолжительности T пребывания образца в цилиндрическом сосуде с мешалкой (точки по оси абсцисс: 1 — для начального образца $T = 0$ мин; 2 — после обработки через 167 мин с одинарной дозой хлора; 3 — после обработки через 334 мин с одинарной дозой хлора; 4 — после обработки через 167 мин с двойной дозой хлора)

Представленная на **рис. 2** графическая зависимость трансформации коэффициента эквивалентной шероховатости K_3 свидетельствует о влиянии как времени пребывания образца, так и концентрации в воде хлора. В качестве одного из предполагаемых (возможных) вариантов интерпретации изменений значений эквивалентной шероховатости может служить тот факт, что в воде присутствуют хлориды и другие соли, которые могут осаждаться в виде кристаллов на поверхности образца, т. е. заполнять поры (впадины) шероховатости, снижая тем самым шероховатость поверхности образца. Данное предположе-

ние может быть обосновано увеличением показателей минерализации воды (с 300 до 326 мг/л) и динамикой изменения косвенного показателя минерализации (электропроводности воды с 427 до 458 мкСм/с), т. е. свидетельствует о появлении в воде дополнительного количества минеральных и органических солей после хлорирования.

Другими словами, не исключается инкрустация, которая в данной ситуации должна рассматриваться как положительное явление, так как оно в конечном итоге способствует снижению коэффициента гидравлического трения λ и тем самым ведет к уменьшению энергетических затрат в случае применения материала Subscote в качестве внутреннего защитного покрытия напорных стальных трубопроводов, транспортирующих питьевую воду.

Эта гипотеза была проверена проведенными расчетами по динамике изменения коэффициента гидравлического трения λ с использованием формулы Прандтля и, как следствие, на потребление электроэнергии [18]. Обработка экспериментальных данных производилась с использованием разработанной авторами автоматизированной программы [19].

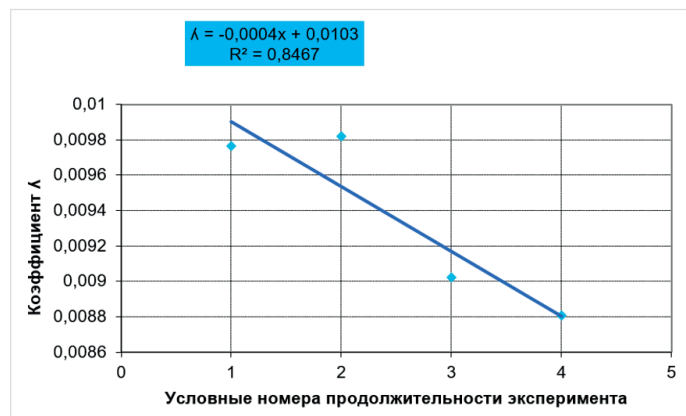


Рис. 3. График зависимости изменения коэффициента гидравлического трения λ в зависимости от продолжительности T пребывания образца в цилиндрическом сосуде с мешалкой (точки по оси абсцисс: 1 — начальный образец $T = 0$ мин; 2 — через 167 мин с одинарной дозой хлора; 3 — через 334 мин с одинарной дозой хлора; 4 — через 167 мин с двойной дозой хлора)

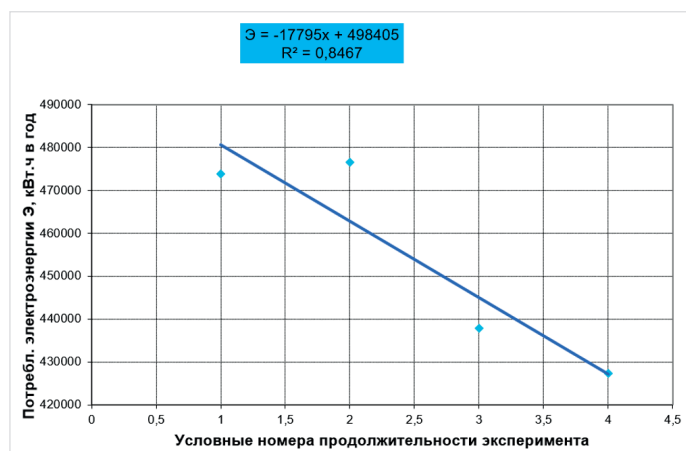


Рис. 4. График зависимости изменения потребления электроэнергии $\mathcal{E}$ (кВт·ч в год) в зависимости от продолжительности T пребывания образца в цилиндрическом сосуде с мешалкой (точки по оси абсцисс: 1 — начальный образец $T = 0$ мин; 2 — через 167 мин с одинарной дозой хлора; 3 — через 334 мин с одинарной дозой хлора; 4 — через 167 мин с двойной дозой хлора)

Анализ графиков на **рис. 3 и 4** показывает идентичный характер снижения коэффициента гидравлического трения и соответственно потребления электроэнергии при транспортировке воды, что подтверждает выдвинутую гипотезу о положительном влиянии инкрустации.

Необходимо отметить, что проведенные аналогичные разовые эксперименты с использованием светоскопии по определению коэффициента эквивалентной шероховатости показали идентичный характер ее уменьшения, где для анализируемых проб образцов величины составили: $K_3 = 37,168$ и $\lambda = 0,01563$ (исходный образец до операции по моделированию на мешалке) и $K_3 = 31,779$ и $\lambda = 0,01511$ (после двойной дозы хлора и времени обработки 167 мин).

Полученные на фотографиях (**рис. 5**) профили поверхности образцов для двух случаев имеют отличия: для исходного образца наблюдается ярко выраженный характер вкраплений или «кустовых сгустков» на поверхности со средним шагом неровностей 70 мкм и наибольшей высотой профиля шероховатости 65 мкм, а для обработанного в цилиндрическом сосуде на мешалке фиксируется более равномерный рельеф поверхности со средним шагом неровностей 200 мкм и наибольшей высотой профиля 43 мкм, что, очевидно, связано с явлениями микроинкрустации.

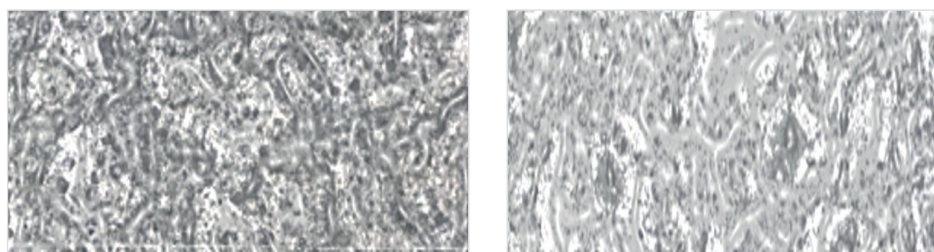


Рис. 5. Профили шероховатости образцов до (слева) и после обработки в цилиндрическом сосуде на мешалке (справа)

Таким образом, полученные результаты позволяют с достаточной степенью вероятности сделать предварительное заключение о необходимости продолжения экспериментальных исследований по моделированию для дополнительного подтверждения выдвинутых гипотез о трансформации шероховатости защитных покрытий трубопроводов при их эксплуатации, в том числе с использованием других типов органических защитных покрытий.

Выводы

1. Разработана и представлена комплексная методика моделирования процессов трансформации химических, гидравлических и энергетических показателей при использовании напыляемого полимерного материала Subcote, используемого в качестве внутреннего защитного покрытия напорных стальных трубопроводов систем водоснабжения в период их ремонта.
2. Представлены и интерпретированы зависимости изменения ряда гидравлических параметров образцов защитного покрытия, влияющих на снижение энергопотребления за счет предполагаемой микроинкрустации.
3. Полученные результаты создают основу дальнейшего исследования (моделирования) гидравлических характеристик иных типов защитных покрытий на крупно и малогабаритных стендах в специализированных лабораториях, в том числе, с учетом влияния температурного фактора на изменение коэффициентов эквивалентной шероховатости как в сторону их уменьшения, так и возможного увеличения (за счет коробления материала покрытий).

Библиографический список

1. Касаткин А. Г. Процессы и аппараты химической технологии. М: Альянс. 2019. 528 с.
2. Колесников М. П. Химическая устойчивость материалов трубопроводов в условиях водоснабжения // Вестник МГСУ. 2019. № 2. С. 92 – 99.
3. Devis G.T. Handbook of Water and Wastewater Treatment Plant Operation // CRC Press / 2019 / 984 p.
4. Викулин П. Д. Осветление и обесцвечивание природных вод в ультразвуковом поле // Системные технологии. 2022. № 1 (42). С. 32 – 40.
5. Викулин П. Д. Обесфторивание подземных вод методом модифицированной загрузки // Системные технологии. 2022. № 3 (44). С. 72 – 79.
6. Викулин П. Д. Реконструкция и увеличение производительности водозаборных сооружений из поверхностных источников // Системные технологии. 2021. № 1 (38). С. 50 – 53.
7. Викулин П. Д. Некоторые вопросы предподготовки минерализованных вод перед опреснением // Системные технологии. 2021. № 4 (41). С. 76 – 81.
8. Хургин Р. Е., Зубарева О. Н., Ефремов Р. В. Искусственное пополнение подземных вод для целей водоснабжения // Системные технологии. 2022. № 3 (44). С. 102 – 106.
9. Андрианов А. П., Ефремов Р. В., Хургин Р. Е. Проблемы современного водоснабжения // Системные технологии. 2022. № 3 (44). С. 5 – 13.
10. Хургин Р. Е., Кулагина А. С. Современный взгляд на водопотребление городов // Системные технологии. 2021. № 1 (38). С. 62 – 65.
11. Викулина В. Б. Применение ультразвука для обработки природных вод // Системные технологии. 2023. № 4 (49). С. 76 – 82.
12. Войтович Р., Липин А., Талага Я. О возможности использования различных моделей турбулентности для расчета гидродинамических и энергетических характеристик аппаратов с мешалками // Журнал Теоретические основы химической технологии. 2014, т. 48, № 4, с. 386 – 402.
13. Grossmann S., Lohse D. Curvature effects on the velocity profile in turbulent pipe flow, Eur. Phys. J. E., 2017. 40, p. 16 – 27.
14. Карнов А. А. Современные методы водоподготовки и защиты оборудования от коррозии и отложений. — М.: Теплоэнергетик. 2020. 288 с.
15. Тархов С. А., Дмитриев А. В. Проблемы и методы предотвращения инкрустации в водопроводных сетях // Водоснабжение и санитарная техника. 2020. № 6. С. 35 – 39.
16. Орлов В. А., Зоткин С. П., Подолян Д. В., Горелов А. В. Расчет экономии электроэнергии при транспортировке воды по напорным трубопроводам после их бестраншейного ремонта. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024615165 от 12.04.2024.
17. Аверкеев И. А. Защитные покрытия как фактор обеспечения гидравлических и прочностных показателей водопроводных и водоотводящих трубопроводов. Автореферат канд. диссертации. НИУ МГСУ. 2013. 20 с.
18. Альтшуль А. Д. Гидравлические сопротивления. М.: Недра. 1970. 216 с.
19. Орлов В. А., Зоткин С. П., Большакова М. А. Моделирование процессов трансформации качественных показателей воды и шероховатости материала стенок трубопроводов при их эксплуатации. Свидетельство о государственной регистрации программ на ЭВМ № 2025685633 от 25.09.2025.

SIMULATION OF WATER FLOW IN APPARATUSES WITH AGITATORS TO STUDY THE EFFECT ON THE ROUGHNESS OF THE WALLS OF PIPELINES

V. A. Orlov
S. P. Zotkin
M. A. Bolshakova

Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU), Moscow

Abstract

The results of studies on modeling the tangential movement of water in small-sized devices with magnetic stirrers as an alternative to the linear flow of water in pipelines, with the placement of small-sized polymer samples of internal protective coatings of pipes used in trenchless repair of engineering networks, are presented. The trends in the transformation of a number of chemical parameters of the initial tap water over time during the process of adding chlorine to it, as well as changes in the roughness of the samples of the studied polymer materials due to the incrustation of mineral salts on their surface, have been identified. In the experiments to determine the hydraulic characteristics of the samples, profilometry and light microscopy methods were used, which made it possible to identify the dynamics of changes in the equivalent resistance coefficients K_e of the given samples. The hydraulic friction coefficients λ and the specific resistance A of the protective coating samples were determined by calculation, and an analysis was carried out of the changes in energy parameters when these coatings are potentially used in the practice of trenchless pipeline repair.

The Keywords

Magnetic stirrers, pipeline, protective coatings, roughness, chemical parameters, encrustation.

Date of receipt in edition

29.09.2026

Date of acceptance for printing

02.10.2026

Ссылка для цитирования:

В. А. Орлов, С. П. Зоткин, М. А. Большакова. Моделирование течения воды в аппаратах с мешалками на предмет влияния на шероховатость материалов стенок трубопроводов. — Системные технологии. — 2026. — № 3 (60). — С. 121 – 130.