

Дьяков Станислав Игоревич, магистрант,
ФГБОУ ВО “Уфимский государственный
нефтяной технический университет”

Шарафиев Роберт Гарафиевич, профессор д.т.н.,
ФГБОУ ВО “Уфимский государственный
нефтяной технический университет”

Ерохин Григорий Андреевич, магистрант,
ФГБОУ ВО “Уфимский государственный
нефтяной технический университет”

Аминова Алина Дамировна, магистрант,
ФГБОУ ВО “Уфимский государственный
нефтяной технический университет”

Константинов Иван Константинович, магистрант,
ФГБОУ ВО “Уфимский государственный
нефтяной технический университет”

МОДЕРНИЗАЦИЯ КОНСТРУКЦИИ ПЕРЕМЕШИВАЮЩЕГО УСТРОЙСТВА ДЛЯ ПРИГОТОВЛЕНИЯ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ ЦЕМЕНТНЫХ РАСТВОРОВ: ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИНЖЕНЕРНЫЙ РАСЧЕТ

Аннотация. Предложена модернизация рамно-винтовой мешалки для абразивных сред путем замены сложных кинематических узлов жестким креплением лопастей и перехода на полый вал, что подтверждено инженерными расчетами. В ANSYS Fluent выполнено численное моделирование гидродинамики по модели Хершеля-Балкли в сравнении с плосколопастным аналогом. Установлено, что новая конструкция обеспечивает трехмерную циркуляцию без застойных зон и аэрации. Это снижает энергозатраты на 25-30% и сокращает время гомогенизации на 30-40%.

Ключевые слова: Перемешивающее устройство, цементный раствор, рамно-винтовая мешалка, гидродинамическое моделирование, ANSYS Fluent, вязкопластичная жидкость, модель Хершеля-Балкли, виброустойчивость.

Современная нефтегазовая и строительная отрасли непрерывно сталкиваются с задачами повышения производственной эффективности и сокращения затрат на всех стадиях технологических процессов, в частности, при строительстве и цементировании скважен. Существенную роль в этом играет подготовка и поддержание требуемого качества цементных растворов, поскольку их реологические характеристики напрямую влияют на темпы работ, состояние оборудования и уровень безопасности операций. Степень перемешивания определяет однородность смеси, предотвращение седиментации тяжелых фракций и стабильность физико-механических свойств конечного продукта.

Традиционные перемешивающие устройства (лопастные, якорные, пропеллерные) при работе с высоковязкими неньютоновскими средами имеют ряд существенных недостатков. Они создают преимущественно тангенциальный поток, что приводит к образованию «цилиндрической каверны» вокруг вала и формированию выраженных застойных зон у днища и стенок емкости. Кроме того, попытки интенсифицировать процесс за счет повышения частоты вращения ведут к



захвату воздуха (аэрации), что недопустимо для цементных систем, и к резкому росту энергопотребления. Существующие конструкции с подвижными шарнирными элементами быстро выходят из строя из-за абразивного износа частицами глины и известняка.

Целью данной работы является разработка и обоснование модернизированной конструкции перемешивающего устройства для цементных растворов, отличающейся повышенной производительностью, надежностью в абразивных условиях и сниженным уровнем энергопотребления.

В отличие от многих исследований, моделирующих перемешивание на воде, в данной работе цементный раствор рассматривается как эффективная сплошная вязкопластичная неньютоновская жидкость. Принят следующий массовый состав: вода – 40%, известняк (микрокальцит) – 30%, коллоидная глина – 20%, гипс – 10%. Плотность смеси составляет $\rho = 1400 \text{ кг/м}^3$.

Для описания реологии использована модель Хершеля-Балкли (HerschelBulkley), характеризующаяся наличием предельного напряжения сдвига ($\tau_0 \approx 10 \text{ Па}$) и пластической вязкостью $\approx 0,15 \text{ Па}\cdot\text{с}$. Наличие τ_0 означает, что в состоянии покоя среда ведет себя как твердое тело, что диктует необходимость создания высокого пускового крутящего момента для «страгивания» осадка со дна емкости.

Базовой моделью послужила рамно-винтовая мешалка (патент РФ № 2807239), демонстрирующая выдающиеся гидродинамические характеристики. Однако оригинальная конструкция содержит сложную кинематическую схему (толкатель внутри полого вала, пружины, механизм динамической регулировки угла наклона лопастей). При работе с абразивной суспензией (частицы глины $\sim 5 \cdot 10^{-6} \text{ м}$, известняка $\sim 3 \cdot 10^{-5} \text{ м}$) попадание твердых фракций в зазоры шарниров неминуемо приводит к заклиниванию механизма.

В рамках модернизации произведен принципиальный отказ от динамической регулировки: Все лопасти (радиальные и вертикальные) жестко закреплены на валу.

Трехмерное перемешивание обеспечивается исключительно за счет пространственной геометрии винтовых лопастей с противоположным направлением винтовых линий.

Резьбовые крепежные элементы заменены на неразъемные заклепочные соединения для исключения самоотвинчивания под действием вибрации.

Привод выполнен по прямой схеме через стандартную трехкулачковую упругую муфту, что упрощает кинематику и повышает ремонтпригодность.

Сравнительное гидродинамическое моделирование проведено в программном комплексе ANSYS Fluent. Расчетная область представляла собой цилиндрическую емкость. Сетка неструктурированная, полиэдральная, с локальным сгущением (inflationlayers) вблизи лопастей и стенок для корректного разрешения пограничного слоя. Моделирование выполнено в нестационарной постановке (Transient). Для отслеживания границы раздела фаз «Воздух – Раствор» применялась модель VOF (VolumeofFluid). В качестве модели вязкости выбрана ламинарная (Laminar), так как расчетное число Рейнольдса для данных условий составляет $Re \approx 1130$, что соответствует ламинарному или переходному режиму течения. Расчеты проводились для режимов вращения 10, 15 и 20 об/мин.

Определяющим условием работоспособности вала является его виброустойчивость. Для однопролетного вала длиной $L = 0,4 \text{ м}$, изготовленного из стали ($\rho = 7850 \text{ кг/м}^3$, $E = 2,2 \cdot 10^{11} \text{ Па}$), был рассчитан безразмерный коэффициент, учитывающий условия закрепления.

Первоначальный расчетный диаметр сплошного вала составил 64 мм. Первая критическая угловая скорость ω_1 рассчитана с учетом приведенной массы вала и перемешивающего устройства ($M_{пр} = 73,86 \text{ кг}$). Рабочая угловая скорость $\omega = 13,975 \text{ рад/с}$. Отношение $\omega/\omega_1 = 30,22/235 = 0,12$, что полностью удовлетворяет условию виброустойчивости жестких валов ($\omega/\omega_1 < 0,7$).



Для снижения материалоемкости при сохранении прочностных характеристик сплошной вал был заменен на полый (трубный прокат). При условии равенства моментов сопротивления, по сортаменту выбрана бесшовная холоднодеформированная труба с наружным диаметром 65 мм и толщиной стенки 10 мм. Это позволило снизить массу вала на 30% без потери жесткости и прочности.

Расчет пускового крутящего момента, необходимого для преодоления предельного напряжения сдвига среды, показал значение $M_{\text{пуск}} \approx 150\text{--}200 \text{ Н}\cdot\text{м}$. С учетом КПД привода (0,85) и коэффициента запаса (1,2–1,5), требуемая мощность составляет около 2,5–3,0 кВт. Для гарантированного страгивания осадка и исключения риска заклинивания при локальном схватывании раствора к установке принят стандартный электродвигатель мощностью 5 кВт (например, АИР-132S4 с редуктором), что обеспечивает более чем двукратный запас по пусковой мощности.

Результаты численного моделирования в ANSYS Fluent наглядно демонстрируют превосходство модернизированной рамно-винтовой конструкции:

Характер потоков: Традиционная плоская мешалка создает преимущественно тангенциальный поток. В вязкопластичной среде это приводит к тому, что перемешивается только узкий слой раствора вокруг вала, а в нижних углах емкости формируются выраженные застойные зоны, где происходит быстрая седиментация глины и известняка. Рамно-винтовая мешалка работает по принципу архимедова винта, генерируя сложную трехмерную циркуляцию (осевую, радиальную и тангенциальную). Она принудительно перекачивает слои среды от стенок к центру и сверху вниз, обеспечивая преодоление предельного напряжения сдвига во всем объеме аппарата.

Время гомогенизации: Оценка однородности проводилась по коэффициенту вариации концентрации (CoV). При частоте 20 об/мин рамновинтовая мешалка достигает условной однородности (CoV < 5%) за время, на 30–40% меньшее, чем у плоской мешалки.

Исключение аэрации: Моделирование свободной поверхности (VOF) показало, что работа плоской мешалки на оборотах, достаточных для вовлечения придонных слоев (40–60 об/мин), приводит к образованию глубокой устойчивой воронки, достигающей лопастей и захватывающей воздух. Аэрация цементных растворов критически снижает их прочность.

Рамно-винтовая мешалка при 10–20 об/мин обеспечивает контролируемое, плавное формирование мелкой воронки без вовлечения воздушной фазы.

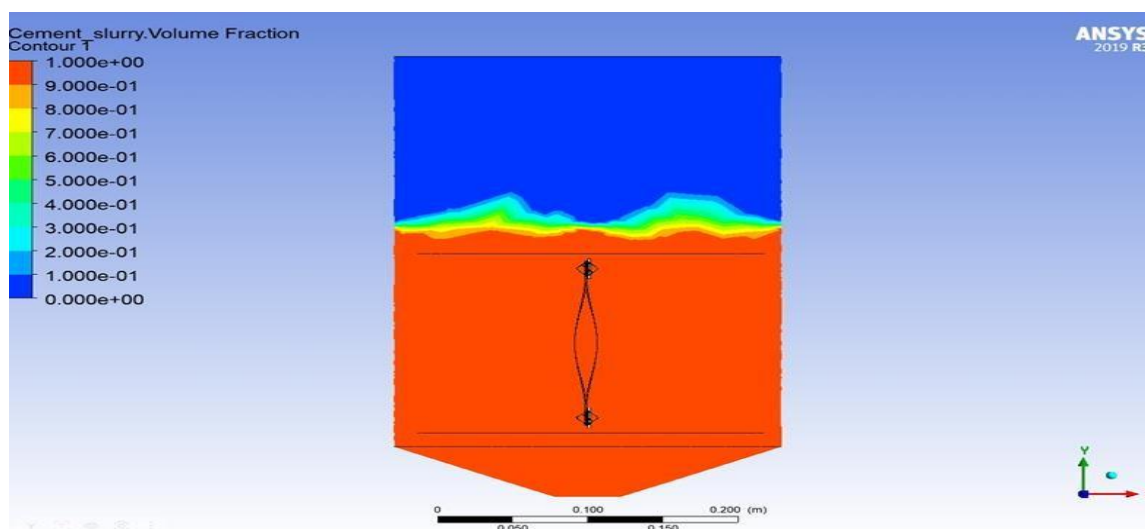


Рисунок 2.1. Поля распределения объемной доли цементного раствора при частоте вращения рамно-винтовой мешалки 10 об/мин



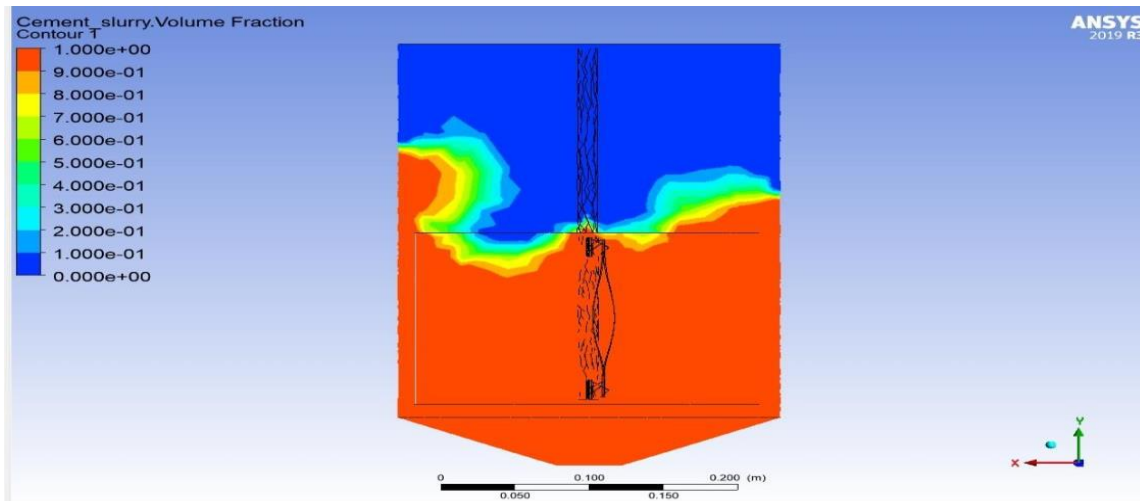


Рисунок 2.2. Поля распределения объемной доли цементного раствора при частоте вращения рамно- винтовой мешалки 15 об/мин

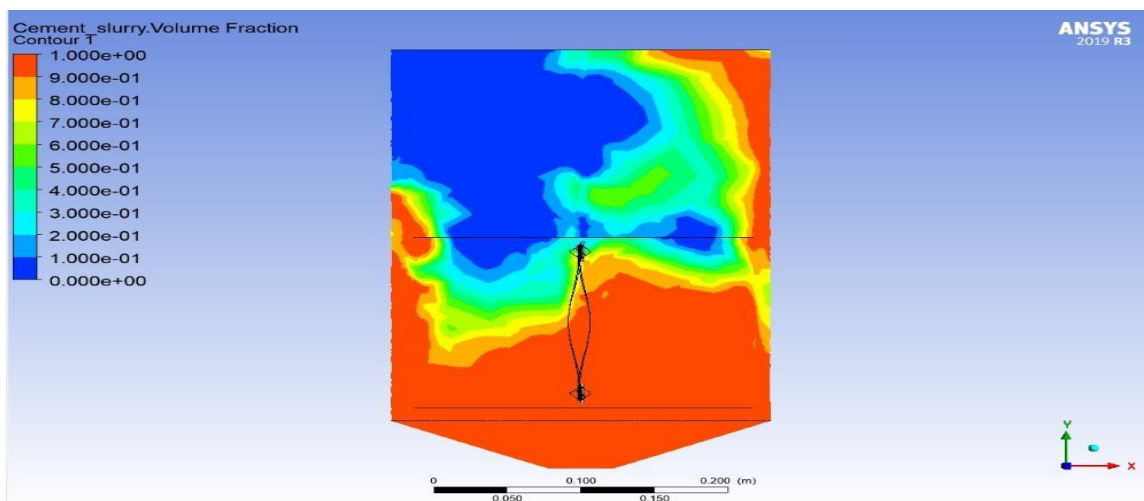


Рисунок 2.3. Поля распределения объемной доли цементного раствора при частоте вращения рамно- винтовой мешалки 20 об/мин

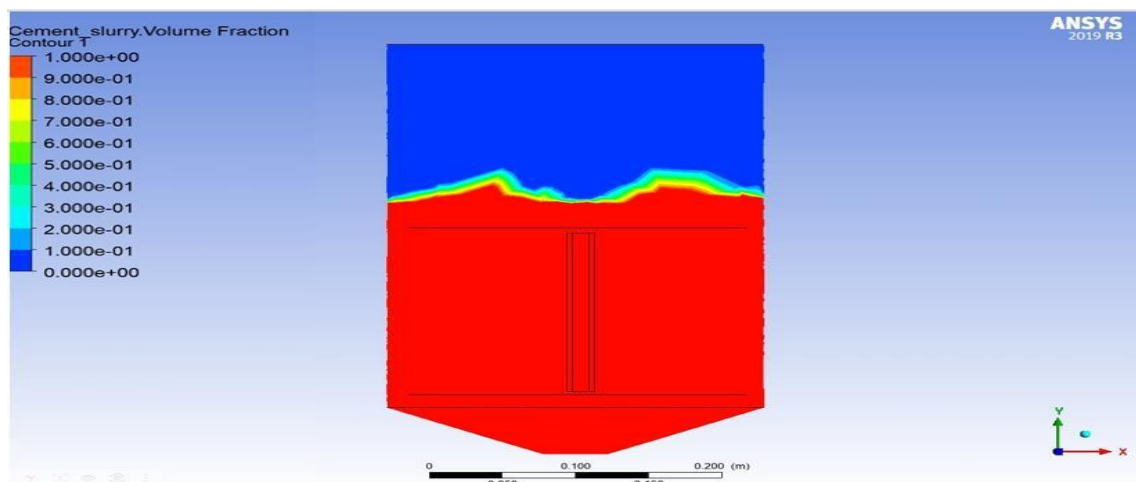


Рисунок 2.4. Поля распределения объемной доли цементного раствора при частоте вращения плоской лопастной мешалки 10 об/мин



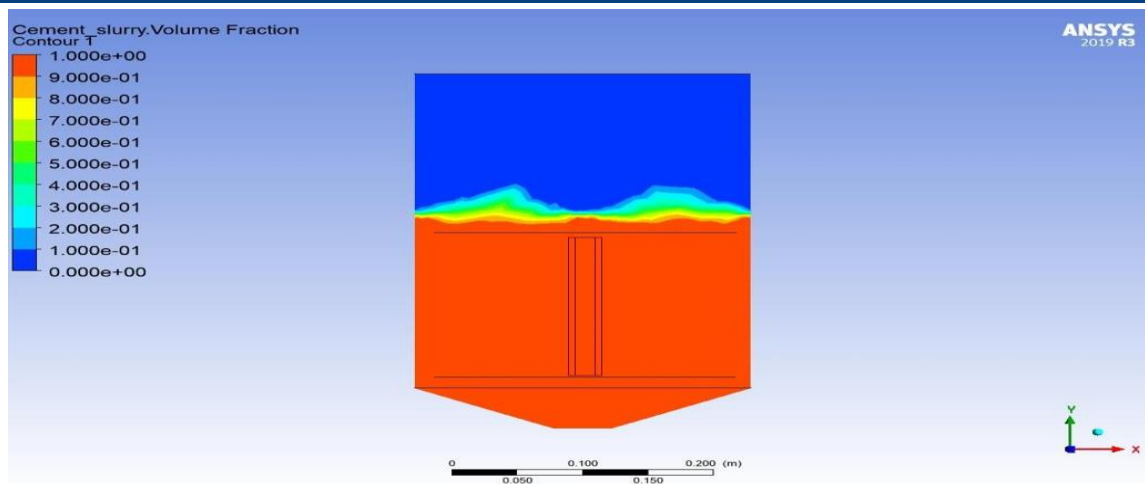


Рисунок 2.5. Поля распределения объемной доли цементного раствора при частоте вращения плоской лопастной мешалки 15 об/мин

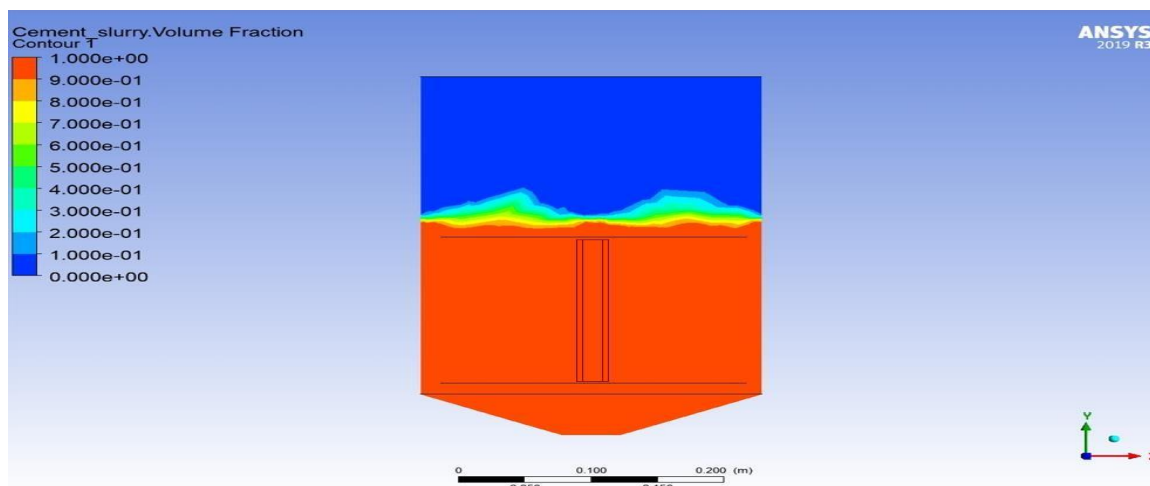


Рисунок 2.6. Поля распределения объемной доли цементного раствора при частоте вращения плоской лопастной мешалки 20 об/мин

Энергоэффективность. Несмотря на более высокий пусковой момент, общее время достижения однородности у рамно-винтовой мешалки меньше. В результате удельные энергозатраты (кВт·ч на 1 м³ готовой смеси) для достижения заданного качества оказываются ниже на 25-30% по сравнению с традиционными лопастными аналогами.

Научная новизна работы заключается в следующем:

Впервые обоснована эффективность применения жесткой рамновинтовой конструкции перемешивающего устройства для гомогенизации многокомпонентных цементных растворов, склонных к седиментации и обладающих выраженными неньютоновскими реологическими свойствами.

Разработана и верифицирована методика численного моделирования процесса перемешивания абразивной суспензии в ANSYS Fluent с использованием модели Хершеля-Балкли, позволяющая количественно оценить степень гомогенизации через коэффициент вариации концентрации.

Предложена конструктивная адаптация устройства для реальных условий эксплуатации: обоснован отказ от сложных кинематических узлов в пользу жесткой конструкции, что многократно повышает надежность.



Практическая ценность работы определяется возможностью прямого внедрения разработанных решений на производстве. Модернизированное устройство обладает высокой ремонтпригодностью, нулевыми затратами на обслуживание подвижных узлов в рабочей зоне и может быть эффективно использовано как в составе стационарных установок, так и мобильных буровых агрегатов.

Проведенные исследования подтверждают, что традиционные перемешивающие устройства не в полной мере отвечают требованиям работы с многокомпонентными вязкопластичными цементными растворами. Модернизированная рамно-винтовая мешалка с жестким креплением лопастей, заклепочными соединениями и прямым приводом через упругую муфту является оптимальным техническим решением.

Она обеспечивает превосходное качество гомогенизации неньютоновской среды при низких оборотах (10–20 об/мин), исключает аэрацию и образование застойных зон, снижает удельные энергозатраты на 25–30% и обладает максимальной конструктивной надежностью в абразивных условиях. Подбор электродвигателя мощностью 5 кВт с двукратным запасом гарантирует надежный пуск и стагнацию осадка без риска перегрузки привода, что делает данное устройство высокоэффективным для современной нефтегазовой и строительной индустрии.

Список литературы:

1. Шарафиев Р.Г., Давлетов О.Б., Альмухаметов А.А. и др. Перемешивающее устройство: патент РФ № 2807239 С1. МПК В01F 7/18. Оpubл. 13.11.2023.
2. Дьяков С.И. Модернизация конструкции перемешивающего устройства в жидких средах: магистерская диссертация. Уфа: УГНТУ, 2026. 87 с.
3. Стренк Ф., Щупляк И.А. Перемешивание и аппараты с мешалками. – М.: Химия, 1975. – 384 с.
4. Васильцов Э.А., Ушаков В.Г. Аппараты для перемешивания жидких сред: справочное пособие. – Л.: Машиностроение, 1979. – 271 с.
5. РД 26-01-90-85. Механические перемешивающие устройства. Метод расчета.
6. ANSYS Fluent Theory Guide. Release 2023 R1. ANSYS, Inc.
7. Морданов С.В., Сыромятников С.Н., Хомяков А.П. Методика расчета полезной мощности механического перемешивающего устройства // Информационная школа молодого ученого: сборник научных трудов. – 2011. – С. 254–2 и 264.

