

Научная статья

УДК 66.021.1:532.5

<https://doi.org/10.24143/1812-9498-2025-2-53-58>

EDN MZRJIZ

Расчетная зависимость критической скорости потока растворителя, при которой реализуется вынос нерастворимых частиц АСПО

**Наталья Александровна Бочкова[✉], Амир Амиржанович Джарканалиев,
Роман Равильевич Султанов**

*Астраханский государственный технический университет,
Астрахань, Россия, ott@astu.org[✉]*

Аннотация. Анализ характера формирования асфальтосмолопарафиновых отложений (АСПО) показал, что комплекс физико-химических явлений на внутренних поверхностях оборудования для нефтяного промысла и перевозки нефтяного сырья, обуславливает образование и накопление твердых веществ органической природы. В современных условиях широко используемыми способами предотвращения и устранения данных отложений в нефтяных магистральных служат химические операции промывания. Растворители углеводородной природы не позволяют снять проблему отведения нерастворимых отложений неорганического происхождения, которое можно сделать возможным лишь путем гидродинамического воздействия, обусловленного интенсивностью движения потока растворителя, степень которой при ее перекачке обеспечивают посредством насосных установок подпорного и магистрального оборудования. В статье рассмотрены методы оперативного определения критической интенсивности движения растворителя, когда осуществляется отведение нерастворимых частиц отложений. В данном варианте режимные параметры лимитируются только рабочим давлением в нефтепроводах, и определения рациональных параметров можно осуществить, решая задачу поддержания критической интенсивности движения при наименьшей энергоёмкости, которую обоснованно априорно оценить. Проведен оценочный расчет минимальной скорости циркуляции моющей среды для удаления частиц заданного размера в трубопроводе определенного диаметра. Подтверждена справедливость полученной модели при условии, что размер частиц не превышает толщину пограничного слоя. Сделан вывод о том, что предложенный метод оперативного расчета критической скорости потока позволит оптимизировать режимы промывки, ограничивая рабочее давление в трубопроводах и минимизируя энергопотребление при обеспечении необходимой эффективности удаления АСПО. Отмечена неприменимость графического метода для случаев, когда размер частиц значительно превышает толщину пограничного слоя, ввиду диспергирования АСПО в турбулентном потоке.

Ключевые слова: нефть, добыча, перекачка, оборудование, асфальтосмолопарафиновые отложения, химические способы промывки, растворитель, критическая интенсивность движения

Для цитирования: Бочкова Н. А., Джарканалиев А. А., Султанов Р. Р. Расчетная зависимость критической скорости потока растворителя, при которой реализуется вынос нерастворимых частиц АСПО // Нефтегазовые технологии и экологическая безопасность. 2025. № 2. С. 53–58. <https://doi.org/10.24143/1812-9498-2025-2-53-58>. EDN MZRJIZ.

Original article

The calculated dependence of the critical solvent flow rate at which the removal of insoluble particles of ARPD is realized

Natalia A. Bochkova[✉], Amir A. Jarkanaliev, Roman R. Sultanov

*Astrakhan State Technical University,
Astrakhan, Russia, ott@astu.org[✉]*

Abstract. An analysis of the nature of the formation of asphalt-resin-paraffin deposits (ARPD) has shown that a complex of physico-chemical phenomena on the internal surfaces of equipment for oil production and transportation of petroleum raw materials causes the formation and accumulation of organic solids. In modern conditions, chemical washing operations are widely used methods for preventing and eliminating bottom sediments in oil pipelines. Solvents of

a hydrocarbon nature do not allow to remove the problem of removing insoluble deposits of inorganic origin, which can be made possible only by hydrodynamic action due to the intensity of the solvent flow, the degree of which is provided during pumping by means of pumping units of back-up and trunk equipment. The article discusses methods for the rapid determination of the critical intensity of solvent movement when insoluble sediment particles are removed. In this variant, the operating parameters are limited only by the operating pressure in the oil pipelines, and the determination of rational parameters can be carried out by solving the problem of maintaining critical traffic intensity with the lowest energy consumption, which is reasonable to estimate a priori. An estimated calculation of the minimum circulation rate of my medium for the removal of particles of a given size in a pipeline of a certain diameter has been carried out. The validity of the obtained model is confirmed, provided that the particle size does not exceed the thickness of the boundary layer. It is concluded that the proposed method of operational calculation of the critical flow rate will optimize flushing modes, limiting the operating pressure in pipelines and minimizing energy consumption while ensuring the necessary efficiency of ARPD removal. The inapplicability of the graphical method is noted for cases when the particle size significantly exceeds the boundary layer thickness, due to the dispersion of ARPD in a turbulent flow.

Keywords: oil, extraction, pumping, equipment, asphalt-resin-paraffin deposits, chemical washing methods, solvent, critical traffic intensity

For citation: Bochkova N. A., Jarkanaliev A. A., Sultanov R. R. The calculated dependence of the critical solvent flow rate at which the removal of insoluble particles of ARPD is realized. *Oil and gas technologies and environmental safety*. 2025;2:53-58. (In Russ.). <https://doi.org/10.24143/1812-9498-2025-2-53-58>. EDN MZRJIZ.

Введение

Варьируемая динамика востребованности и ориентиров поставок энергоносителей на мировом рынке обуславливает выбор новых подходов к перевозке нефтегазового сырья (НГС), опираясь на низкозатратные и гибкие варианты варьирования направлений и объемов его перекачивания по отечественным и экспортным маршрутам. При этом, даже с учетом экономически более выгодного экспорта углеводородного сырья, его отечественные поставки становятся все более приоритетными, что является результатом целого ряда федеральных программ и проектов, ориентированных на расширение ареала переработки НГС и газификации удаленных регионов РФ, в частности, Восточной Сибири, Дальнего Востока и Арктики [1–3].

К перспективным путям достижения поставленной цели, опираясь на накопленный мировой опыт, следует причислить универсализацию магистральных трубопроводов для перекачивания нефти, газа, а также продуктов из НГС и нетрадиционных материалов [4, 5]. Трубопроводы в России обладают широко развитой сетевой системой, причем направления многих газо-, нефтепродуктопроводов преимущественно совпадают или противоположно ориентированы [4, 6].

В процессе использования магистральной сети на внутренних поверхностях трубопроводов постепенно накапливаются отложения органической природы, такие как парафины, смолы и асфальтены. Именно они обуславливают сокращение эффективного диаметра линейных трубопроводных участков по причине утолщения пристенных прослоек, что определяет снижение энергоэффективности перекачивания НГС и данных внутритрубной диагностики. Асфальтосмолопарафиновые отложения (АСПО) являются твердым углеводородным комплексом, включающем асфальтосмолистые (20–40 % масс.) и парафиновые (20–70 % масс.) субстанции. АСПО

накапливаются во всей нефтепромысловой сети: в системе сбора и подготовки нефтяного сырья (НС), в трубопроводах для трансфера готовых материалов до товарных емкостей [2–4, 6].

В современных условиях широко используемыми способами предотвращения и устранения данных отложений в нефтяных магистральных являются химические операции промывания. Следует обратить внимание на тот факт, что растворители углеводородной природы не позволяют решить проблему отведения нерастворимых отложений неорганического происхождения, которое можно сделать возможным лишь путем гидродинамического воздействия, обусловленного интенсивностью движения потока растворителя, степень которой при ее перекачке обеспечивают посредством насосных установок подпорного и магистрального оборудования.

В статье рассматриваются методы оперативного определения критической интенсивности движения растворителя, когда осуществляется отведение нерастворимых частиц отложений. В данном варианте режимные параметры лимитируются только рабочим давлением в нефтепроводах, и определить рациональные параметры можно, решив задачу поддержания критической интенсивности движения при наименьшей энергоемкости, которую обоснованно априорно оценить [7–11].

Результаты и обсуждение

Согласно опыту практического и эмпирического изучения рассматриваемой проблемы, размеры частиц АСПО находятся в пределах от 0,052 до 0,086 мм, т. е. они сопоставимы с толщиной пограничного слоя при перемещении жидкой среды в турбулентном режиме промывания нефтепроводов [7, 8, 10]. В таком варианте градиент интенсивности движения пограничного слоя существенно больше, чем в ядре потока растворителя, следо-

вательно, влияние подъемной силы по отношению к иным усилиям, влияющим на частицу в состоянии покоя у внутренней поверхности трубопровода, становится заметным.

С целью отведения частицы с нижнего участка трубы с внутренним диаметром d целесообразно обеспечить критическую интенсивность движения потока W_n для преодоления лобового сопротивле-

ния и обеспечения нужной подъемной силы. На частицу с размером Δ , удельным весом твердого вещества γ_t на нижнем участке внутренней поверхности трубопровода, по которому осуществляется перекачивание жидкой среды с удельным весом жидкости γ_j , воздействуют определенные силы, представленные на рисунке.

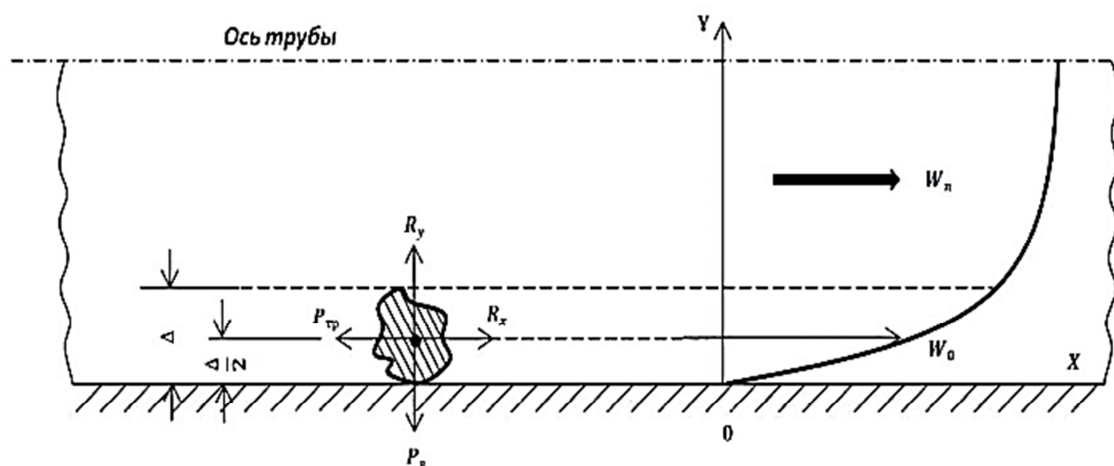


Схема влияния потока на частицу АСПО

Diagram of the effect of the flow on the ARPD particle

Сила R_x обусловлена лобовым сопротивлением C_x при обтекании частицы:

$$R_x = C_x \frac{\gamma_j}{2g} k \Delta^2 W_0^2, \quad (1)$$

где C_x – параметр лобового сопротивления; $k \Delta^2$ – проекция поперечного сечения частицы на плоскость, ортогональную к усилию; k – параметр формы частицы; g – ускорение свободного падения, м/с²; W_0 – интенсивность движения на уровне центра частицы, м/с.

Вес частицы в жидкой среде:

$$P_B = k \Delta^3 (\gamma_t - \gamma_j). \quad (2)$$

Подъемное усилие при обтекании частицы жидкой средой с варьируемой интенсивностью движения с градиентом dW/dy по сечению потока:

$$R_y = C_x \frac{\gamma_j}{g} k W_0 \frac{dW}{dy} \Delta^3. \quad (3)$$

Усилие сопротивления частицы поверхности трубопровода $P_{тр}$, обусловленная весом частицы в жидкой среде и коэффициентом сопротивления f :

$$P_{тр} = f(P_B - R_y). \quad (4)$$

Стационарные условия начала равномерного перемещения частицы со дна трубопровода при идентичности сил R_x и $P_{тр}$:

$$C_x \frac{\gamma_j}{g} k \Delta^2 W_0^2 = f \Delta^3 \left(k (\gamma_t - \gamma_j) - \frac{\gamma_j}{g} W_0 \frac{dW}{dy} \right). \quad (5)$$

При сравнении частицы в кубической форме с ребром Δ и шарообразной формы такого же диаметра частицы d принимаем для последней $k = 0,6$ и параметр лобового сопротивления в пределах от 0,1 до 0,3. Тогда $C_x = 0,2$ и аналогично $f = 0,7$.

После определенной математической трансформации соотношение (5) имеет вид:

$$0,143 \frac{\gamma_j}{g} W_0^2 = \Delta \left(\gamma_t - \gamma_j - 1,667 \frac{\gamma_j}{g} W_0 \frac{dW}{dy} \right). \quad (6)$$

При средней W_n , когда частица перемещается, необходимо найти W_0 и dW/dy , которые обусловлены W_n в данной точке. Принимая во внимание теоретические положения о пограничной прослойке при перемещении жидкой среды в турбулентном режиме жидкости, рассмотрим понятие безразмерной координаты:

$$\bar{y} = \frac{V_0 y}{\nu}, \quad (7)$$

где V_0 – интенсивность турбулентных пульсаций, м/с; y – расстояние от стенки трубопровода, м; ν – кинематическая вязкость жидкой среды, м²/с.

Закономерность распределения W по сечению имеет вид:

$$W = V_0 \bar{y} \text{ для } 0 \leq \bar{y} \leq 5; \quad (8)$$

$$W = 10V_0 \arctg(0,1; \bar{y}) + 12V_0 \text{ для } 5 \leq \bar{y} \leq 30. \quad (9)$$

Принимая во внимание, что из трубопровода потоком растворителя выводятся разногабаритные частицы, оценим зоны по сечению. С этой целью трансформируем соотношение Дарси – Вейсбаха для касательных напряжений σ_T :

$$\sigma_T = \lambda \frac{\gamma_{ж}}{8g} W_n^2, \quad (10)$$

где W_n – средняя интенсивность движения потока по трубе; λ – коэффициент гидравлического сопротивления для гладких трубопроводов ($\lambda = \frac{0,3164}{Re^{0,25}}$

по соотношению Блазиуса, где $Re = \frac{W_n d}{\nu}$ – критерий Рейнольдса).

При этом соотношение для характерной интенсивности турбулентных пульсаций или динамической интенсивности движения (10) потока можно представить, как:

$$V_0 = \sqrt{\frac{\sigma_T}{\rho_{ж}}} = \frac{0,2W_n}{Re^{0,125}}, \quad (11)$$

где $\rho_{ж}$ – плотность жидкой среды, кг/м³.

Решая систему соотношений (10) и (11) для $\bar{y} = 5$ и $\bar{y} = \Delta/2$ имеем соотношение для определения толщины пограничной прослойки Π при $0 \leq \Delta \leq \Pi$:

$$\Pi = \lambda \frac{\nu^{0,875} d^{0,125}}{W_n^{0,875}}. \quad (12)$$

Величины W_0 и dW/dy в (6) для $y = \Delta/2$ найдем, принимая во внимание (7):

– при $0 \leq \bar{y} \leq 5$ по (8)

$$W_0 = \frac{V_0^2 \Delta}{2\nu}$$

$$\text{и } \frac{dW}{dy} = \frac{V_0^2}{\nu};$$

– при $5 \leq \bar{y} \leq 30$ по (9)

$$W_0 = 10V_0 \arctg\left(0,05 \frac{V_0 \Delta}{\nu}\right) + 12V_0$$

$$\text{и } \frac{dW}{dy} = \frac{V_0^2}{\nu \left[1 + \left(0,05 \frac{V_0 \Delta}{\nu}\right)^2\right]}.$$

В результате, при условиях $0 \leq \Delta \leq \Pi$ и $0 \leq \bar{y} \leq 5$ системы уравнений (6) и (11) обуславливает соотношение для

$$W_n = \sqrt[3,5]{\frac{714g(\rho_T - \rho_{ж})\nu^{1,5}d^{0,5}}{\Delta\rho_{ж}}}. \quad (13)$$

Из (13) следует, что наименьшая допустимая интенсивность промывания должна увеличиваться при вязкости увеличения растворителя, разницы удельных весов жидкой и твердой фаз, диаметра трубы и снижения габаритов частиц нерастворимых отложений.

Проведем оценку наименьшей величины W циркуляции моющей среды $\nu = 0,02$ см²/с ($2 \cdot 10^{-6}$ м²/с) и $\rho_{ж} = 850$ кг/м³ по трубе $d = 50$ см (0,5 м) для отведения нерастворенных частиц при $\Delta = 0,005$ см ($50 \cdot 10^{-6}$ м) и $\rho_T = 920$ кг/м³ по (13): $W_n = 44,4$ см/с.

Осуществим проверку выполнения условия (12) по толщине пограничной прослойки: $\Pi = 0,105$ см. Поскольку $\Pi = 0,105$ см больше $\Delta = 0,005$ см, использование (13) справедливо, и, как следствие, определение критической W_n проведено адекватно.

Заключение

Оперативный расчет критической скорости потока растворителя, при которой реализуется вынос нерастворимых частиц АСПО, позволит ограничить максимальные режимы рабочих давлений технологических трубопроводов вследствие обеспечения заданной критической скорости потока растворителя при минимальном энергопотреблении. Следует отметить, что при $\Pi \leq \Delta \leq 6\Pi$, когда размер частицы превышает толщину пограничной прослойки, решение системы соотношений по отношению к W_n осуществить затруднительно, и по этой причине эту задачу решают графически. Такой вариант для циркуляционного промывания труб для перекачивания НС моющими средами в турбулентном режиме неприемлем в инженерной практике по причине диспергирования частиц АСПО под влиянием диффузионных процессов.

Список источников

- Минина Н. Н., Дьяконова Д. Е., Изилиянов А. Ю. Экологические проблемы при добыче нефти и пути их решения // Заметки ученого. 2020. № 7. С. 103–107.
- Жильцов С. С. Каспийский регион: новые энергетические потоки и новые вызовы // Каспийский регион: политика, экономика, культура. 2015. № 3 (44). С. 64–71.
- Баранник С. Ф., Харитонов А. Р., Пурчина О. А., Ткачук И. Д. Совершенствование процесса транспортировки нефти // Материалы всерос. (нац.) науч.-практ. конф. «Актуальные проблемы науки и техники. 2022». Ростов н/Д.: 2022. С. 17–19.

4. Лемке Е. Э., Тявина А. Д. Морская перевозка нефти с арктических месторождений. перспективы развития и правовое регулирование в современных геополитических условиях // Сб. науч. тр. по материалам II Международ. науч.-практ. конф. «Экономика, финансы и управление: теория и практика». Анапа, 2023. С. 18–29.

5. Галимова А. И., Лей Х. Исследование процессов транспортировки нефти и газа с минимальными потерями углеводородов и выбросами вредных веществ в атмосферу // *International Journal of Humanities and Natural Sciences*. 2024. № 6-3 (93). С. 171–175.

6. Знаменская А. В., Завертнева М. В. Пути снижения себестоимости в компаниях, относящихся к нефтегазовой отрасли, и вектор их развития // Сб. ст. XIII Международ. науч.-практ. конф. «Повышение управленческого, экономического, социального и инновационно-технического потенциала предприятий, отраслей и народно-хозяйственных комплексов». Пенза: Пенз. гос. аграр. ун-т, 2022. С. 105–109.

7. Коробов Г. Ю., Парфенов Д. В., Нгуен В. Т. Механизмы образования асфальтосмолопарафиновых отло-

жений и факторы, влияющие на интенсивность их формирования // Изв. Том. политехн. ун-та. Инжиниринг георесурсов. 2023. Т. 334, № 4. С. 103–116.

8. Стрелкова К. Ю. и др. Причины образования и технологии борьбы с асфальтосмолопарафиновыми отложениями // Сб. лучших научных работ молодых ученых по результатам XLVII студен. науч. конф. «Молодежная наука». Краснодар: Кубан. гос. технолог. ун-т, 2022. С. 66–74.

9. Богатов М. В. и др. Предотвращение образования асфальтосмолопарафиновых отложений на поверхности насосно-компрессорных труб путем нанесения внутренних покрытий // Нефтегаз. дело. 2022. Т. 20, № 1. С. 74–81.

10. Митрошин А. В. Определение минимальных мероприятий в скважине по предотвращению образования асфальтосмолопарафиновых отложений // Недропользование. 2021. Т. 21, № 2. С. 94–100.

11. Малышев А. А., Боткин И. О. Методы и средства борьбы с отложениями АСПО // Сб. тез. XII Международ. науч.-практ. конф. Ижевск: Ижев. ин-т компьютер. исслед., 2022. С. 65–70.

References

1. Minina N. N., D'jakonova D. E., Iziljanov A. Ju. *Jekologicheskie problemy pri dobyche nefiti i puti ih reshenija* [Environmental problems in oil production and ways to solve them]. *Zametki uchenogo*, 2020, no. 7, pp. 103-107.

2. Zhil'cov S. S. *Kaspijskij region: novye jenergeticheskie potoki i novye vyzovy* [The Caspian region: new energy flows and new challenges]. *Kaspijskij region: politika, jekonomika, kul'tura*, 2015, no. 3 (44), pp. 64-71.

3. Barannik S. F., Haritonova A. R., Purchina O. A., Tkachuk I. D. *Sovershenstvovanie processa transportirovki nefiti* [Improving the oil transportation process]. *Materialy vserossijskoj (nacional'noj) nauchno-prakticheskoj konferencii «Aktual'nye problemy nauki i tehniki. 2022»*. Rostov-na-Donu, 2022. Pp. 17-19.

4. Lemke E. Je., Tjavina A. D. *Morskaja perevozka nefiti s arkticheskikh mestorozhdenij. perspektivy razvitiya i pravovoe regulirovanie v sovremennyh geopoliticheskikh uslovijah* [Sea transportation of oil from Arctic fields. development prospects and legal regulation in modern geopolitical conditions]. *Sbornik nauchnyh trudov po materialam II Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii «Jekonomika, finansy i upravlenie: teorija i praktika»*. Anapa, 2023. Pp. 18-29.

5. Galimova A. I., Lej H. *Issledovanie processov transportirovki nefiti i gaza s minimal'nymi poterjami uglevodorodov i vybrosami vrednyh veshhestv v atmosferu* [Investigation of oil and gas transportation processes with minimal hydrocarbon losses and emissions of harmful substances into the atmosphere]. *International Journal of Humanities and Natural Sciences*, 2024, no. 6-3 (93), pp. 171-175.

6. Znamenskaja A. V., Zavertneva M. V. *Puti snizhenija sebestoimosti v kompanijah, odnosjashhihsja k neftegazovoj otrasli, i vektor ih razvitiya* [Ways to reduce costs in companies related to the oil and gas industry and the vector of their development]. *Sbornik statej XIII Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii «Povyshenie upravlencheskogo,*

jekonomicheskogo, social'nogo i innovacionno-tehnicheskogo potenciala predpriyatij, otraslej i narodno-hozjajstvennyh kompleksov». Penza, Penzenskij gosudarstvennyj agrarnyj universitet, 2022. Pp. 105-109.

7. Korobov G. Ju., Parfenov D. V., Nguen V. T. *Mehanizmy obrazovaniya asfal'tosmoloparafinovyh otlozhenij i faktory, vlijajushhie na intensivnost' ih formirovaniya* [Mechanisms of formation of asphalt-resin-paraffin deposits and factors influencing the intensity of their formation]. *Izvestija Tomskogo politehnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov*, 2023, vol. 334, no. 4, pp. 103-116.

8. Strelkova K. Ju. i dr. *Prichiny obrazovaniya i tehnologii bor'by s asfal'tosmoloparafinovymi otlozhenijami* [Causes of formation and technologies for combating asphalt-resin-paraffin deposits]. *Sbornik luchshih nauchnyh rabot molodyh uchenykh po rezul'tatam XLVII studencheskoj nauchnoj konferencii «Molodezhnaja nauka»*. Krasnodar, Kubanskij gosudarstvennyj tehnologicheskij universitet, 2022. Pp. 66-74.

9. Bogatov M. V. i dr. *Predotvrashhenie obrazovaniya asfal'tosmoloparafinovyh otlozhenij na poverhnosti nasosno-kompressornyh trub putem nanosenija vnutrennih pokrytij* [Preventing the formation of asphalt-resin-paraffin deposits on the surface of tubing by applying internal coatings]. *Neftgazovoe delo*, 2022, vol. 20, no. 1, pp. 74-81.

10. Mitroshin A. V. *Opredelenie minimal'nyh meroprijatij v skvazhine po predotvrashheniju obrazovaniya asfal'tosmoloparafinovyh otlozhenij* [Determination of minimum measures in the well to prevent the formation of asphalt-resin-paraffin deposits]. *Nedropol'zovanie*, 2021, vol. 21, no. 2, pp. 94-100.

11. Malyshev A. A., Botkin I. O. *Metody i sredstva bor'by s otlozhenijami ASPO* [Methods and means of combating ARPD deposits]. *Sbornik tezisov XII Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii*. Izhevsk, Izhevskij institut komp'juternyh issledovanij, 2022. Pp. 65-70.

Информация об авторах / Information about the authors

Наталья Александровна Бочкова – старший преподаватель кафедры технологических машин и оборудования; Астраханский государственный технический университет; ott@astu.org

Natalia A. Bochkova – Senior Lecturer of the Department of Technological Machines and Equipment; Astrakhan State Technical University; ott@astu.org

Амир Амиржанович Джарканалиев – магистрант кафедры технологических машин и оборудования; Астраханский государственный технический университет; amir.vaer@gmail.com

Amir A. Jarkanaliev – Master's Course Student of the Department of Technological Machines and Equipment; Astrakhan State Technical University; amir.vaer@gmail.com

Роман Равильевич Султанов – магистрант кафедры технологических машин и оборудования; Астраханский государственный технический университет; sultanov.roman2001@bk.ru

Roman R. Sultanov – Master's Course Student of the Department of Technological Machines and Equipment; Astrakhan State Technical University; sultanov.roman2001@bk.ru

