

**ЗАКОНОМЕРНОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ РАБОТЫ АДГЕЗИИ К ПОВЕРХНОСТИ СТАЛИ
РАСТВОРА СУЛЬФОНАТНОЙ ПРИСАДКИ В БАЗОВОМ МАСЛЕ НС-4
ПРИ ОБРАБОТКЕ УЛЬТРАЗВУКОМ В ПРИСУТСТВИИ СУКЦИНИМИДНЫХ ПРИСАДОК**

Г. АННАЕВ

ORCID <https://orcid.org/0009-0002-9872-0788>

канд. техн. наук, доц. А.А. ЕРМАК

ORCID <https://orcid.org/0000-0003-4398-1796>

А.Н. АБРАМЕНКО

ORCID <https://orcid.org/0009-0000-3457-6727>

(Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой)

Представлены результаты исследования влияния обработки ультразвуком высокощелочной сульфонатной присадки на поверхностное натяжение и углы смачивания стальной пластинки раствором сульфонатной присадки в базовом гидрокрекинговом масле НС-4 в присутствии сукцинимидных присадок различной молекулярной массы. Выявлены закономерности изменения работы адгезии к стальной пластине раствора сульфонатной присадки в базовом масле при обработке ультразвуком без и в присутствии сукцинимидных присадок. Показано, что ультразвуковая обработка способствует модификации межфазных взаимодействий, а введение сукцинимидных присадок оказывает стабилизирующее влияние на свойства образующейся дисперсной системы. Полученные результаты позволяют оптимизировать состав пакетов присадок для повышения антикоррозионных свойств смазочных материалов и могут найти практическое применение при разработке новых пакетов присадок.

Ключевые слова: сульфонатные присадки, сукцинимидные присадки, базовое масло, поверхностное натяжение, работа адгезии, ультразвук, антикоррозионные свойства.

Введение. В современных условиях развития машиностроения и транспортной отрасли вопросы повышения долговечности и надежности металлических конструкций приобретают особую значимость. Одним из ключевых факторов, определяющих эксплуатационные характеристики и срок службы оборудования, является защита металлических поверхностей от коррозионного разрушения. Коррозия не только приводит к ухудшению механических свойств и преждевременному выходу из строя деталей, но и вызывает значительные экономические потери, связанные с ремонтом и заменой оборудования, а также риски для безопасности эксплуатации машин и механизмов.

Среди многочисленных подходов к обеспечению антикоррозионной защиты важное место занимают смазочные материалы с многофункциональными присадками, способными формировать на поверхности металла устойчивые защитные пленки. Особый интерес в этом контексте представляют сульфонатные присадки, обладающие выраженной способностью к пассивации металлов, высокой термической и химической стабильностью, а также способностью ингибировать процессы электрохимической коррозии. За последние десятилетия сульфонатные соединения получили широкое распространение в составе современных смазочных композиций [1–4]. В работе [5] проведена качественная и количественная оценка эффективности использования сульфонатных присадок в смеси с гидрокрекинговым базовым маслом НС-4 в качестве ингибирующих составов для защиты стали от коррозии.

Но несмотря на высокую эффективность, карбонатированные сульфонаты характеризуются определенной склонностью к агрегации и выпадению в осадок, особенно при длительном хранении и эксплуатации масел в условиях повышенных температур и механических нагрузок. Это приводит к снижению их антикоррозионных свойств и ухудшению других эксплуатационных характеристик смазочных материалов. Для повышения коллоидной стабильности и предотвращения агрегации в рецептуры смазочных композиций вводят диспергирующие и стабилизирующие компоненты, среди которых особое место занимают сукцинимидные присадки. Они способствуют равномерному распределению сульфонатных частиц в объеме масла и стабилизации защитных пленок на поверхности металла [6].

В последние годы все большее внимание уделяется использованию физических методов воздействия на присадочные системы, в частности, ультразвуковой обработке [7–10]. Ультразвук способен эффективно диспергировать компоненты, разрушать агломераты и способствовать формированию более однородных и прочных защитных слоев на металле. Однако влияние ультразвука на адгезионные характеристики сульфонатных присадок в присутствии сукцинимидных стабилизаторов до настоящего времени изучено недостаточно.

Работа адгезии раствора присадки к металлической поверхности рассматривается в качестве ключевого параметра, определяющего эффективность формирования защитного слоя и, как следствие, антикоррозионные свойства системы. Изучение закономерностей изменения работы адгезии при комплексном воздействии ультразвука и диспергирующих присадок позволит обосновать новые подходы к созданию более эффективных смазочных материалов для защиты стали от коррозии.

Целью настоящей работы является исследование влияния ультразвуковой обработки и присутствия сукцинимидных присадок различной молекулярной массы на работу адгезии растворов сульфонатных присадок в базовом масле HC-4 к поверхности стали.

Исследовательская часть. В качестве объектов исследования использованы:

- гидрокрекинговое базовое масло HC-4 с кинематической вязкостью при 100 °C 4,3 мм²/с, индексом вязкости 121 п., содержанием серы 10 мг/кг;
- карбонатированная сульфонатная присадка (СП) со щелочным числом 412 мг КОН/г;
- сукцинимидная присадка на основе изобутилена со средней молекулярной массой 1050 г/моль и щелочным числом 69 мг КОН/г;
- сукцинимидная присадка на основе изобутилена со средней молекулярной массой 2450 г/моль и щелочным числом 18 мг КОН/г.

Для изучения закономерности изменения работы адгезии были приготовлены образцы путем механического перемешивания компонентов при температуре 50–60 °C в течение 1 ч. Содержание сульфонатной присадки в растворе 5% масс. Содержание сукцинимидных присадок в растворе по 5% масс.

Обработка сульфонатной присадки ультразвуком проводилась при помощи ультразвукового диспергатора VCX-130 PB (Sonics Material (Cole-Parmer), США) при температуре не выше 60 °C.

Работа адгезии (W_a , Дж) растворов к поверхности стальной пластинки рассчитывалась по уравнению Дюпре–Юнга [11]: $W_a = \sigma(1 + \cos\theta)$, где σ – поверхностное натяжение на границе газ–жидкость, мН/м; θ – краевой угол смачивания.

Поверхностное натяжение определялось при помощи автоматического тензиометра Q2000 (Китай) при температуре 20 °C. Величина краевого угла смачивания образцами стальной пластинки измерялась при помощи цифрового микроскопа МИКМЕД 5.0 (Китай) с программным обеспечением для измерения углов с точностью до 0,01°. Для проведения исследований были использованы предварительно отшлифованные пластинки из стали со следующим элементным составом (в % масс.): железо – 98,3; марганец – 0,6; хром – 0,232; кремний – 0,197; никель – 0,153; углерод – 0,145; медь – 0,110; молибден – 0,061; примеси других элементов – 0,202. Элементный состав стальной пластинки был определен при помощи оптико-эмиссионного спектрометра SPECTROPORT (Германия).

Результаты изучения влияния удельной энергии ультразвуковой обработки сульфонатной присадки на поверхностное натяжение ее раствора в базовом масле HC-4 без и в присутствии сукцинимидных присадок представлены на рисунке 1.

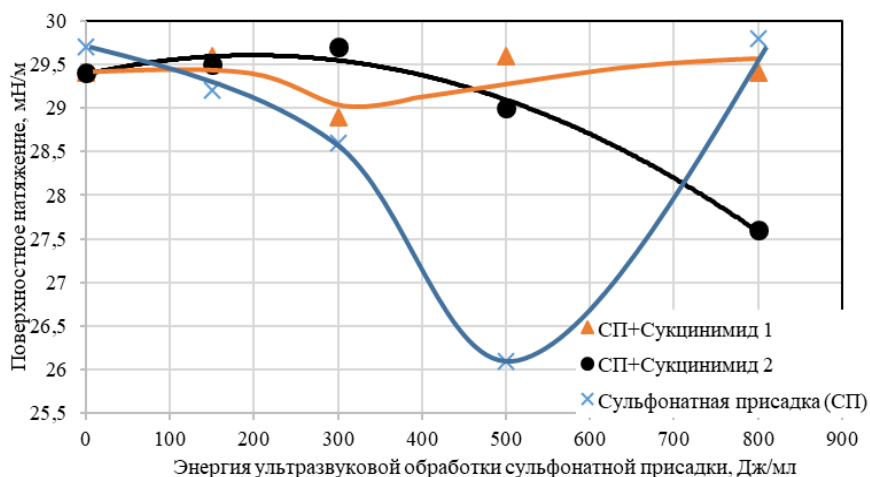


Рисунок 1. – Влияние удельной энергии ультразвуковой обработки сульфонатной присадки на поверхностное натяжение ее раствора в базовом масле HC-4 без и в присутствии сукцинимидных присадок

Установлено, что увеличение удельной энергии ультразвуковой обработки приводит к снижению поверхностного натяжения раствора сульфонатной присадки. Это указывает на повышение поверхностной активности системы. Введение сукцинимидных присадок способствует стабилизации поверхностного натяжения и снижает чувствительность раствора к ультразвуковому воздействию. Наиболее выраженный стабилизирующий эффект отмечается у сукцинимидной присадки с меньшей молекулярной массой.

Результаты изучения влияния удельной энергии ультразвуковой обработки сульфонатной присадки на угол смачивания стальной пластинки ее раствором в базовом масле HC-4 без и в присутствии сукцинимидных присадок представлены на рисунке 2.

Как видно из рисунка 2, при увеличении удельной энергии ультразвуковой обработки угол смачивания для раствора сульфонатной присадки сначала уменьшается, достигая минимума, а затем возрастает. Это свиде-

тельствует о повышении смачиваемости поверхности стали при оптимальных режимах ультразвукового воздействия. Введение сукцинимидных присадок приводит к увеличению угла смачивания и сглаживает экстремальный характер зависимости, особенно для присадки с меньшей молекулярной массой, что указывает на стабилизирующее влияние данных добавок на свойства системы.

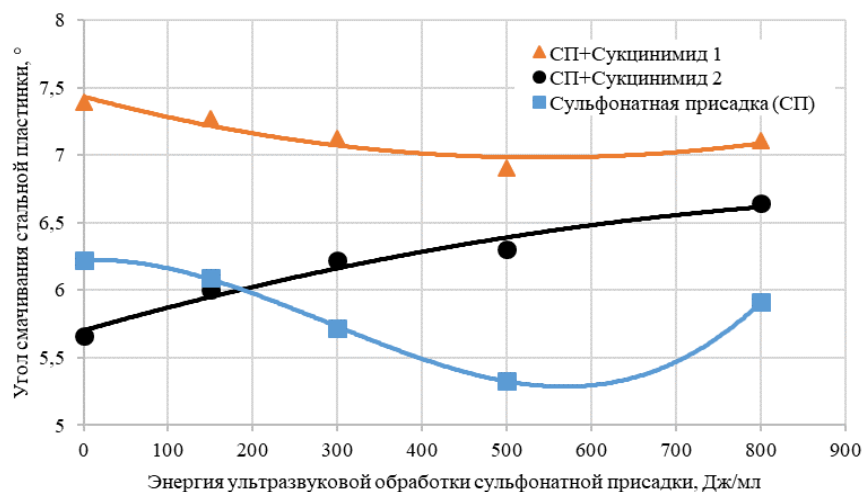


Рисунок 2. – Влияние удельной энергии ультразвуковой обработки сульфонатной присадки на угол смачивания стальной пластинки ее раствором в базовом масле Н-С4 без и в присутствии сукцинимидных присадок

Влияние удельной энергии ультразвуковой обработки сульфонатной присадки на работу адгезии, рассчитанной по уравнению Дюпре–Юнга, к стальной пластинке ее раствора в базовом гидрокрекинговом масле НС-4 без и в присутствии сукцинимидных присадок представлено на рисунке 3.

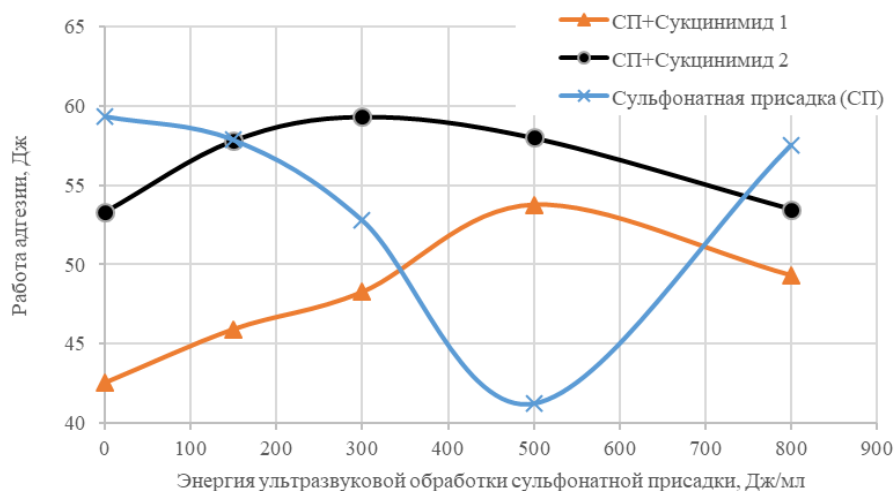


Рисунок 3. – Влияние удельной энергии ультразвуковой обработки сульфонатной присадки на работу адгезии к стальной пластинке ее раствора в базовом масле НС-4 без и в присутствии сукцинимидных присадок

Отмечено, что для раствора сульфонатной присадки в базовом масле без добавок сукцинимидов наблюдается выраженный экстремальный характер зависимости работы адгезии от энергии ультразвуковой обработки. Так, при увеличении энергии до 500 Дж/мл работа адгезии снижается, после чего вновь возрастает. Введение сукцинимидных присадок приводит к сглаживанию данной зависимости. Особенно заметен стабилизирующий эффект для сукцинимидов с большей молекулярной массой (Сукцинимид 2), где работа адгезии изменяется незначительно во всем диапазоне энергий. Таким образом, сукцинимидные присадки способствуют стабилизации адгезионных свойств системы и уменьшают влияние ультразвуковой обработки на работу адгезии.

В процессе растворения присадок в базовом масле протекают процессы коагуляции и диспергирования входящих в них компонентов, в конечном итоге приводящие к формированию мицелл определенного состава и строения. При обработке сульфонатной присадки ультразвуком происходит диспергирование содержащихся в ее составе ватеритов с размером частиц от 33 до 36 нм [12], что приводит к изменению их коллоидного состо-

яния. При диспергировании количество мицелл увеличивается, а при коагуляции уменьшается. При этом увеличивается их размер.

Оценка влияния обработки ультразвуком сульфонатной присадки и введения в раствор сукцинимидных присадок на коллоидное состояние исследуемых образцов проводилась путем сравнения изменения ими коэффициента пропускания света с длиной волны 500 нм. Длина волны проходящего света выбрана на основании экспериментальных данных. Исследования проводились при помощи спектрофотометра ЭКРОСХИМ ПЭ-5400УФ (Россия). Зависимость изменения коэффициента пропускания света исследуемыми образцами от удельной энергии ультразвуковой обработки сульфонатной присадки перед ее введением в раствор представлена на рисунке 4.

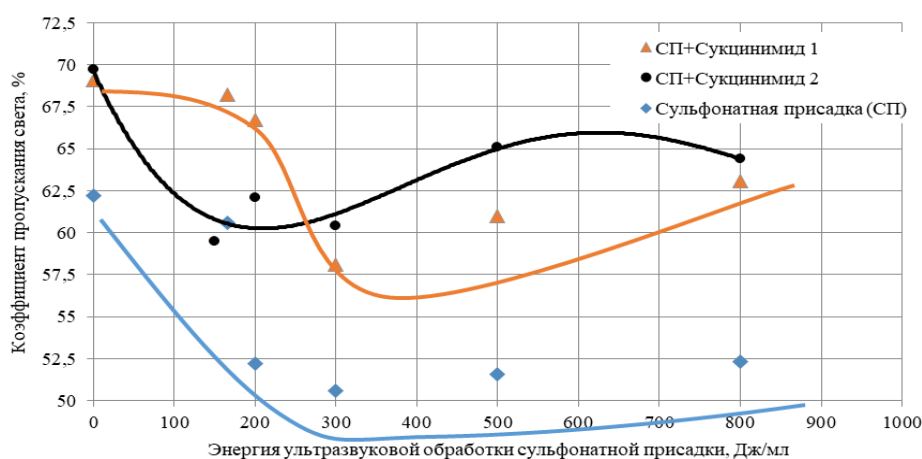


Рисунок 4. – Влияние удельной энергии ультразвуковой обработки сульфонатной присадки на коэффициент пропускания света ее раствором в базовом масле НС-4 без и в присутствии сукцинимидных присадок

Установлено, что при увеличении энергии ультразвуковой обработки сульфонатной присадки для раствора без добавок сукцинимидов наблюдается выраженное снижение коэффициента пропускания света. Это свидетельствует о росте степени дисперсности системы и образовании мелкодисперсных частиц. Введение сукцинимидных присадок приводит к заметному увеличению коэффициента пропускания света по сравнению с чистой сульфонатной присадкой и сглаживает экстремальный характер зависимости, особенно для присадки с большей молекулярной массой. Это указывает на стабилизирующее действие сукцинимидных присадок и повышение коллоидной стабильности раствора.

Таким образом, ультразвуковая обработка сульфонатной присадки перед ее введением в базовое масло НС-4 приводит к снижению краевого угла смачивания поверхности стали и увеличению работы адгезии. Введение сукцинимидных присадок различной молекулярной массы оказывает стабилизирующее воздействие на систему, предотвращая агрегацию частиц дисперсной фазы, содержащихся в сульфонатной присадке.

Максимальное повышение работы адгезии наблюдается при совместном применении ультразвуковой обработки и сукцинимидных присадок с меньшей молекулярной массой, что связано с эффективной диспергацией и формированием стабильного защитного слоя.

Заключение. Проведенные эксперименты показали, что ультразвуковая обработка в сочетании с введением сукцинимидных присадок существенно повышает работу адгезии сульфонатных присадок в базовом масле НС-4 к поверхности стали. Наиболее выраженный эффект достигается при использовании сукцинимидных присадок с меньшей молекулярной массой. Полученные результаты могут быть применены для оптимизации состава пакетов присадок с целью повышения антикоррозионных свойств смазочных материалов и найти практическое применение при разработке новых пакетов присадок.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шехтер Ю.Н., Крейн С.Э., Калашников В.П. Маслорастворимые сульфонаты (производство и применение). – М.: Гостехиздат, 1963. – 127 с.
2. Шехтер Ю.Н. Защита металлов от коррозии (ингибиторы, масла и смазки). – М., Л.: Химия, 1964. – 120 с.
3. Богданова Т.И., Шехтер Ю.Н. Ингибированные нефтяные составы для защиты от коррозии. – М.: Химия, 1984. – 248 с.
4. Специальные технологии переработки природных энергоносителей: Производство присадок и пакетов присадок \к маслам: учеб.-метод. комплекс / С.В. Покровская, И.В. Бурая, Ю.А. Булавка и др. – Новополюцк: Полоц. гос. ун-т, 2013. – 94 с.
5. Антикоррозионные свойства сульфонатных присадок / Г. Аннаев, А.А. Ермак, Н.А. Советников и др. // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. В, Пром-сть. Приклад. науки. – 2024. – № 1(49). – С. 107–111. DOI 10.52928/2070-1616-2024-49-1-107-111

6. Кулиев А.М. Химия и технология присадок к маслам и топливам. – Л.: Химия, 1985. – 312 с.
7. Клокова Т.П., Володин Ю.А., Глаголева О.Ф. Влияние ультразвука на коллоидно-дисперсные свойства нефтяных систем // Химия и технология топлив и масел. – 2006. – № 1. – С. 32–34.
8. Кузнецов О.Л., Ефимова С.Ф. Применение ультразвука в нефтяной промышленности. – М.: Недра, 1983. – 192 с.
9. Туманян Б.П. Ультразвук на промысле и не только // Нефть России. – 1997. – № 7. – С. 45–46.
10. Иванов М.Г., Иванов Д.М., Бурая И.В. Закономерности изменения антикоррозийной активности сульфонатных присадок в полиальфоолефиновом масле под действием ультразвука // Бутлеровские сообщения. – 2022. – Т. 72, № 11. – С. 106–113. DOI: 10.37952/ROI-jbc-01/22-72-11-106
11. Люпис К. Химическая термодинамика материалов: [пер. с англ.] / под ред. Н.А. Ватолина, А.Я. Стомахина. – М.: Металлургия, 1989. – 503 с.
12. Calcium carbonate phase transformations during the carbonation reaction of calcium heavy alkylbenzene sulfonate overbased nanodetergents preparation / Zhaocong Chen, Shan Xiao, Feng Chen et al. // Journal of Colloid and Interface Science. – 2011. – Vol. 359, Iss. 1. – P. 56–67. DOI: 10.1016/j.jcis.2011.03.086

REFERENCES

1. Shekhter, Yu.N., Kreyn, S.E. & Kalashnikov, V.P. (1963). *Maslorastvorimye sul'fonaty (proizvodstvo i primeneniye)*. Moscow: Gostoptekhizdat. (In Russ.).
2. Shekhter, Yu.N. (1964). *Zashchita metallov ot korrozii (ingibitory, masla i smazki)*. Moscow, Leningrad: Khimiya. (In Russ.).
3. Bogdanova, T.I. & Shekhter, Yu.N. (1984). *Ingibirovannyye neftyanye sostavy dlya zashchity ot korrozii*. Moscow: Khimiya. (In Russ.).
4. Pokrovskaya, S.V., Buraya, I.V., Bulavka, Yu.A., Babushkin, M.O. & Zavadskii, A.V. (2013). *Spetsial'nye tekhnologii pererabotki prirodnkh energonositelei: Proizvodstvo prisadok i paketov prisadok k maslam*. Novopolotsk: Polotsk state University. (In Russ.).
5. Annaev, G., Ermak, A.A., Sovetnikov, N.A. & Mammedov, B.M. (2024). Antikorroziionnye svoystva sul'fonatnykh prisadok [Anticorrosive Properties of Sulfonate Additives]. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya V, Promyshlennost'. Prikladnye nauki [Herald of Polotsk State University. Series B, Industry. Applied Science]*, 1(49), 107–111. DOI 10.52928/2070-1616-2024-49-1-107-111 (In Russ., abstr. in Engl.).
6. Kuliev, A.M. (2024). *Khimiya i tekhnologiya prisadok k maslam i toplivam*. Leningrad: Khimiya. (In Russ.).
7. Klokov, T.P., Volodin, Yu.A. & Glagoleva, O.F. (2006). Vliyaniye ul'trazvuka na kolloidno-dispersnyye svoystva neftyanykh sistem. *Khimiya i tekhnologiya topliv i masel*, (1), 32–34. (In Russ.).
8. Kuznetsov, O.L. & Efimova, S.F. (1983). *Primeneniye ul'trazvuka v neftyanoy promyshlennosti*. Moscow: Nedra. (In Russ.).
9. Tumanyan, B.P. (1997). Ul'trazvuk na promysle i ne tol'ko. *Neft' Rossii*, (7), 45–46. (In Russ.).
10. Ivanov, M.G., Ivanov, D.M. & Buraya, I.V. (2022). Zakonomernosti izmeneniya antikorroziynoy aktivnosti sul'fonatnykh prisadok v polial'foolefinovom masle pod deystviem ul'trazvuka [Patterns of changes in the anticorrosion activity of sulfonate additives in polyalphaolefin oil under the action of ultrasound]. *Butlerovskie soobshcheniya [Butlerov Communications]*, 72(11), 106–113. DOI: 10.37952/ROI-jbc-01/22-72-11-106 (In Russ., abstr. in Engl.).
11. Lyupis, K. (1989). *Khimicheskaya termodinamika materialov: [per. s angl.]*. In N.A. Vatolina & A.Ya. Stomakhina (Eds). Moscow: Metallurgiya. (In Russ.).
12. Zhaocong, Chen, Shan, Xiao, Feng, Chen, Dongzhong, Chen, Jianglin, Fang & Min, Zhao. (2011). Calcium carbonate phase transformations during the carbonation reaction of calcium heavy alkylbenzene sulfonate overbased nanodetergents preparation. *Journal of Colloid and Interface Science*, 359(1), 56–67. DOI: 10.1016/j.jcis.2011.03.086

Поступила 30.06.2025

REGULARITIES OF CHANGING THE WORK OF ADHESION TO THE SURFACE OF A SOLUTION OF SULFONATE ADDITIVE IN BASE OIL NS-4 DURING ULTRASONIC TREATMENT IN THE PRESENCE OF SUCCINIMIDE ADDITIVES

G. ANNAYEV, A. YERMAK, A. AVRAMENOK
(Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk)

The article presents the results of a study of the effect of ultrasonic treatment of a highly alkaline sulfonate additive on the surface tension and wetting angles of a steel plate with a solution of the sulfonate additive in the base hydrocracking oil NS-4 in the presence of succinimide additives of different molecular weights. The regularities of changes in the work of adhesion to a steel plate of a solution of the sulfonate additive in the base oil during ultrasonic treatment without and in the presence of succinimide additives are revealed. It is shown that ultrasonic treatment contributes to the modification of interphase interactions, and the introduction of succinimide additives has a stabilizing effect on the properties of the resulting dispersed system. The obtained results allow optimizing the composition of additive packages to improve the anticorrosive properties of lubricants and can find practical application in the development of new additive packages.

Keywords: sulfonate additives, succinimide additives, base oil, surface tension, adhesion work, ultrasound, anti-corrosive properties.