- 10. Алферов И.В., Зырянов В.М., Митрофанов Н.А. Влияние конденсаторных установок на перетоки мощности высших гармоник в автономной энергосистеме // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22, № 8 (139). С. 95–103.
- 11. Зырянов В. М., Кирьянова Н. Г., Митрофанов Н. А. Применение устройств ограничения высших гармоник на основе батарей статических конденсаторов в автономной энергосистеме // Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. 2018. № 2 (71). С. 131–142.
- 12. Долгих Н. Н., Катеров Ф. В., Осипов Д. С., Птицына Е. В., Файфер Л. А. Определение коэффициентов искажения синусоидальности формы кривой тока по вейвлет-коэффициентам // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2015. № 113. С. 814—825.
- 13. Santoso S., Grady W. M., Powers E.J., Lamoree J. and Bhatt S.C. "Characterization of distribution power quality events with Fourier and wavelet transforms" // IEEE Transactions on Power Delivery. 2000. Vol. 15, no. 1. Pp. 247-254. DOI: 10.1109/61.847259.
- 14. Ren J., Kezunovic M. "Real-time power system frequency and phasors estimation using recursive wavelet transform" // IEEE Transactions on Power Delivery. 2011. Vol. 26, no. 3. Pp. 1392-1402. DOI: 10.1109/TPWRD.2011.2135385.
- 15. Gomez-Luna E., Silva D., Aponte G., Pleite J. G., Hinestroza D. "Obtaining the Electrical Impedance Using Wavelet Transform From the Time Responce" // IEEE Transactions on Power Delivery. 2013. Vol. 28, Issue 2. Pp. 1242-1244. DOI: 110.1109/TPWRD.2012.2234942.
- 16. Osipov D. S., Kovalenko D. V., Dolgikh N. N. Calculation of currents resonance at higher harmonics in power supply systems based on wavelet packet transform // 2017 Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics). P. 1–6. DOI: 10.1109/Dynamics.2017.8239492.
- 17. Osipov D. S., Dolgikh N. N., Goryunov V. N., Kovalenko D.V. Algorithms of packet wavelet transform for power determination under nonsinusoidal modes" // 2016 Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines, Dynamics. P. 1–5. DOI: 10.1109/Dynamics.2016.7819059.
- 18. Осипов Д. С., Долгих Н. Н., Горовой С. А., Поплавская В. Е. Анализ дополнительных потерь от высших гармоник в сетях 380 В с помощью алгоритмов пакетного вейвлет-преобразования // Омский научный вестник. Сер. Приборы, машины и технологии. 2018. № 6 (162). С. 76–81.

УДК 621.6.03

# ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕЙ С ПРИМЕСЯМИ

А. Г. Михайлов, В. С. Виниченко, И. П. Пышный, А. Е. Иванова, Е. Н. Слободина Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

Аннотация. Важнейшая задача теплоэнергетики — увеличение эффективности работы тепловых установок. Одним из способов повышения эффективности является улучшение теплофизических свойств теплоносителей. В данной работе исследовано изменение плотности наножидкостей, приготовленных на основе трансформаторного масла Т-1500У (дисперсная среда) и различных твердых частиц (дисперсная фаза). Показано влияние природы выбранных частиц (неодим, керамика, латунь), их концентрации и размера. Установлено, что введение выбранных примесей приводит к существенному повышению плотности получаемой наножидкости по сравнению с чистым маслом. Показано, что плотность наножидкости с уменьшением размера частиц увеличивается.

Ключевые слова: наножидкость, плотность, наночастицы, суспензия.

DOI: 10.25206/2310-4597-2019-1-89-93

## І. Введение

Развитие промышленности ставит новые задачи перед инженерами и исследователями. Главными вопросами по-прежнему остаются качество продукции, рентабельность производства, актуальность выпускаемой продукции и т.д. Современное производство неразрывно связано с современными научными достижениями и грамотный инженер всегда должен держать «руку на пульсе» в сфере новинок. В частности, активно идёт изу-

чение «особых» материалов—наножидкостей. Наножидкость — это дисперсная система, состоящая из основной жидкости и твердых наночастиц, имеющих размер от 1 до 100 нм. Особое внимание уделяется теплофизическим свойствам, таким как теплоемкость и коэффициенты теплопроводности и теплоотдачи, а также изменению вязкости и плотности. Например, увеличение теплопроводности наножидкости делает ее очень перспективным рабочим телом во многих теплоэнергетических устройствах: для охлаждения различных установок, при создании современных систем передачи и выработки тепловой энергии и т.д. Однако, несмотря на значительное количество работ в этой области, многие проблемы остаются малоизученными, что требует дальнейшего исследования свойств наножидкостей.

## II. Постановка задачи

Задачей исследования являлось получение теплоносителя с различными видами примесных частиц и экспериментальное определение свойств полученных коллоидно-дисперсных жидкостей. Необходимо было установить, как размеры частиц, их природа и концентрация влияют на такой параметр жидкости, как плотность  $(\rho)$ .

#### III. ТЕОРИЯ

Вода, как теплоноситель, получила довольно широкое распространение в теплоэнергетике. Ее главными достоинствами являются ее термодинамические свойства. Однако при нормальном давлении воду можно нагреть максимум до 100 °C. После вышеуказанной температуры вода переходит из жидкого агрегатного состояния – в парообразное, а теплофизические свойства пара значительно отличаются от свойств жидкости, причем в худшую сторону. Чтобы нагреть воду до более высокой температуры необходимо увеличивать давление в системе.

Если рассматривать в качестве теплоносителя масло, то здесь мы выигрываем в температуре, то есть его температура кипения значительно выше, чем у воды, но проигрываем в коэффициенте теплоотдачи.

Так как наука не стоит на месте, учеными была выдвинута теория о том, что при добавлении в жидкость дисперсных частиц свойства полученной суспензии будут существенно меняться.

Рассмотрим формулу для определения плотности теплового потока [4]

$$q = \rho c V \Delta T$$

где q — тепловой поток [Bт/м<sup>2</sup>]

 $\rho$  – плотность носителя [кг/м<sup>3</sup>]

c – массовая теплоёмкость [Дж/(кг·К)]

v – скорость течения жидкости [ $M/c^2$ ]

 $\Delta T$  – температурный напор [K]

Распишем размерности выше представленных величин

$$\rho c V \Delta T = \frac{\kappa F}{M^2} \frac{\mathcal{H} \kappa}{\kappa F K} \frac{M}{c} K = \frac{BT}{M^2 K} K$$

Коэффициент теплоотдачи  $\alpha$  имеет размерность  $^{\text{BT}}/_{\text{M}^2\text{K}}$ , следовательно из этого можно сделать вывод, что коэффициент теплоотдачи зависит от плотности жидкости.

Если говорить о суспензиях, то их плотность будет увеличиваться с ростом концентрации растворенных в жидкости частиц. Причем, на это изменение плотности также будет оказывать влияние размер и род этих частиц.

# IV. Результаты экспериментов и обсуждение результатов

Для проведения исследований были использованы следующие материалы: неодим марки N 45V с размерами частиц 0,4–0,8 мкм, латунь марки Л63 с размерами частиц 2–3 мкм и оксид кремния с размерами частиц 0,75–1 мкм. В качестве основы-жидкости было использовано трансформаторное масло Т-1500У. Получение суспензии осуществлялось при помощи смешения масла с частицами. Массовые концентрации частиц составляли 0,5%, 1% и 1,5%. Перемешивание жидкости и взвеси примесей проводилось с использованием оборудования ресурсного центра «Политест» на базе Омского Государственного Технического Университета. Для получения суспензий использовалась ультразвуковая ванна УЗВ-3 (рис. 1) с ультразвуковым диспергатором УЗП-100 (рис. 2).



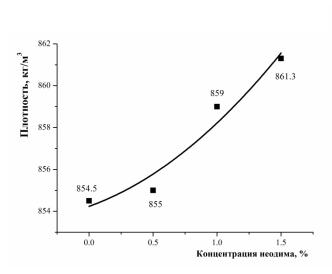


Рис. 1. Ультразвуковая ванна УВЗ-3

Рис. 2. Блок управления ультразвуковым диспергатором УЗП-100

В итоге было получено 9 образцов с разной процентной концентрацией примесей. Далее для предварительного расчёта коэффициента теплоотдачи для каждого из материалов были проведены замеры плотностей при помощи набора ареометров АОН-1 (700-1840 кг/м³) по ГОСТ 18481-81.

Результаты экспериментов представлены на рис. 3-5.



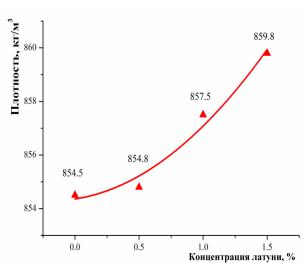


Рис. 3. Зависимость плотности суспензии от концентрации частиц неодима  $N\ 45V$ 

Рис. 4. Зависимость плотности суспензии от концентрации частиц латуни марки Л63

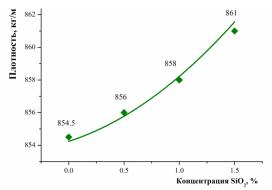


Рис. 5. Зависимость плотности суспензии от концентрации частиц керамического порошка

Из графиков на рисунках видно, что при малой концентрации максимальную плотность имеет жидкость, смешанная с керамикой, но с увеличением концентрации наибольшую плотность имеет жидкость, смешанная с неодимом. Это связано с тем, что при малой концентрации большая часть частиц керамики смешивается с жидкостью, что увеличивает плотность суспензии по отношению к другим материалам. В большей концентрации лучше растворяются частицы с наименьшим размером, что приводит к увеличению плотности по сравнению с другими смесями.

В целом, плотность с увеличением концентрации примесей растёт. В работе [3] было показано, что теплоёмкость наножидкостей также увеличивается с ростом концентрации наночастиц. Об этом говорит график, полученный для смеси этиленгликоля с частицами оксида алюминия (рис. 6).

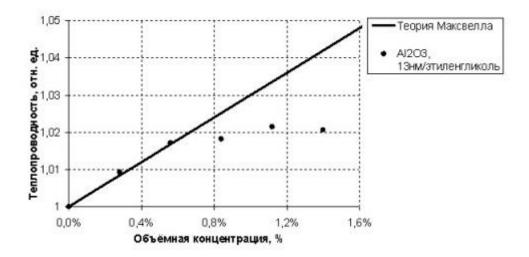


Рис. 6. Зависимость теплопроводности этиленгликоля от концентрации частиц оксида алюминия

Увеличение теплопроводности и плотности жидкости приведёт к росту коэффициента теплоотдачи.

В результате анализа полученных данных, была установлена также зависимость плотности жидкости от размеров частиц. На графике 7 приведены значения для плотности смесей при одинаковой массовой концентрации частиц (1,5%).

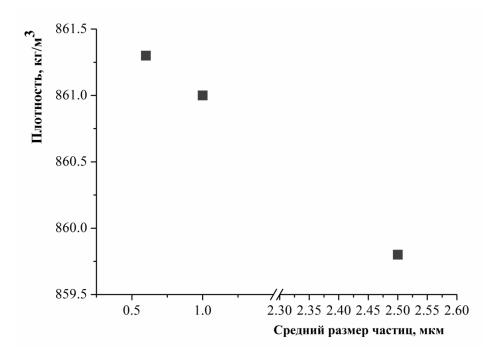


Рис. 7. Зависимость плотности жидкости от размера частиц при одинаковой массовой концентрации (1,5%)

Из графика видно, что наименьший размер частиц соответствует наибольшей плотности. Это объясняется тем, что мелкие частицы более равномерно распределены по всему объёму и меньше подвержены агломерации.

#### VI. Выводы и заключение

Исходя из полученных результатов, можно сделать вывод, что внесение наночастиц изменяет теплофизические свойства носителя. Плотность суспензии тем выше, чем больше концентрация частиц, добавленных к основной жидкости. Коэффициент теплоотдачи для таких жидкостей будет существенно выше, чем у чистых. Также было установлено, что размеры частиц влияют на плотность суспензии.

## Список литературы

- 1. Михайлов А. Г, Вдовин О. В., Слободина Е. Н. Процессы теплообмена в объеме жаротрубного котла с неводяным теплоносителем // Омский научный вестник. 2018. № 3 (159). С. 37–40.
- 2. Михайлов А. Г., Вдовин О. В., Слободина Е. Н. Теплообмен в элементах жаротрубного котла с изменением теплофизических свойств теплоносителя // Омский научный вестник. 2018. № 4 (160). С. 73–78.
- 3. Бардаханов С. П., Новопашин С. А., Серебрякова М. А. Исследование теплопроводности наножидкостей на основе наночастиц оксида алюминия // Наносистемы: физика, химия, математика. 2012. № 3 (1). С. 27–33.
  - 4. Исаченко В. П., Осипова В. А., Сукомёл А. С. Теплопередача: учебник. М.: Энергоиздат, 1981. 416 с.
- 5. Рудяк В. Я., Минаков А. В., Краснолуцкий С. В. физика и механика процессов теплообмена в течениях наножидкостей // Физическая мезомеханика.2016. Т. 19, № І. С. 75–83.

УДК 621.311

# ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ УРОВНЯ ПРОДОЛЬНОЙ КОМПЕНСАЦИИ НА ВОЗНИКНОВЕНИЕ И РАЗВИТИЕ ПОДСИНХРОННОГО РЕЗОНАНСА

Д. В. Рысев, П. В. Рысев

Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

Аннотация. Рассматривается влияние уровня продольной компенсации линии электропередачи на возникновение и развитие явления электромеханического резонанса в турбогенераторе при самоустраняющемся коротком замыкании в нагрузке. Показано моделирование энергосистемы. Показана зависимость амплитуды крутильных колебаний в многомассовой модели турбоагрегата при изменении уровня продольной компенсации. Явление подсинхронного резонанса возможно в изолированных энергосистемах с нелинейной нагрузкой и продольной компенсацией. Цель исследования — выявить зависимость амплитуды колебаний в механической части турбогенератора от уровня продольной компенсации.

Ключевые слова: подсинхронный резонанс, турбогенератор, крутильные колебания.

DOI: 10.25206/2310-4597-2019-1-93-98

## І. Введение

Развитие технологии передачи электрической энергии привело к созданию устройств продольной компенсации — систем, позволяющих компенсировать потребляемую реактивную мощность за счет ее выработки. Подобная компенсация повышает коэффициент мощности и увеличивает пропускную способность линий электропередачи. Однако, при определенном сочетании типа и мощности электростанции, вида и мощности нагрузки, уровня компенсации и наличия возмущений в системе возможно возникновение нежелательных режимов, приводящих к скручиванию элементов многомассовой системы электростанции. Такая ситуация подробно описывалась как в зарубежных [1] — [4], так и в отечественных источниках [5], [6].

Целью данной статьи является моделирование подсинхронного резонанса в турбогенераторе при изменении уровня продольной компенсации.

## ІІ. Постановка задачи

Таким образом, задача исследования сводится к моделированию энергосистемы, содержащей турбогенератор, линию электропередачи, нагрузку и устройства продольной емкостной компенсации при внешнем воз-