

высоких скоростях вращения ротора. Для переносимости результатов на реальную геометрию требуются исследования при скоростях вращения винтов порядка 50000 об/мин. Исследования экспериментальных моделей на разрыв показало, что данные образцы не выдерживают таких скоростей вращения. Для повышения прочности образцов потребуется другая технология изготовления, как, например, в [6].

Большой шум самого электродвигателя приводит к четко наблюдаемым роторным гармоникам в спектре шума соосных винтов.

При соблюдении равенства тяг с увеличением диаметра уменьшаются уровни шума у винтов по причине уменьшения окружных скоростей.

Рассмотрение соосной (тандемной) схемы расположения винтов показало, что в спектре воздушных винтов присутствует, кроме традиционных компонент шума, тональный шум высокого уровня на комбинационных частотах.

#### Литература

1. Grinyok, A., Boychuk, I., Perelygin, D., Dantsevich, I. 2018 Simulation in production of open rotor propellers: From optimal surface geometry to automated control of mechanical treatment IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 327 (2), 022038.
2. Замтфорт Б.С. Двигатель с открытым ротором в свете ужесточения требований по авиационной экологии // Известия Самарского научного центра РАН. – 2012. – т.14. – №6. – С. 307-308.
3. Open Rotor Engine. Aeroacoustic Technology. Final Report. Continuous Lower Energy, Emissions and Noise (CLEEN) Program. Submitted by General Electric. DOT/FAA/AEE2014-04 /by the FAA's Office of Environment and Energy.
4. Whitfield, C. E., Manl, R., Gillebe, P.R. (1990)

High Speed Turboprop Aeroacoustic Study (Counterrotation). Volume I - Model Development. NASA Contractor Report 185241

5. Гринек А.В., Бойчук И.П., Косолап Ю.Г. Цифровое моделирование в жизненном цикле изделий и автоматизации технологических процессов судостроения // Эксплуатация морского транспорта. – 2019. – № 4 (93). – С. 100-114.
6. Truong A., Papamoschou D. Aeroacoustic Testing of Open Rotors at Very Small Scale. AIAA 2013-0217.

#### References

1. Grinyok, A., Boychuk, I., Perelygin, D., Dantsevich, I. 2018 Simulation in production of open rotor propellers: From optimal surface geometry to automated control of mechanical treatment IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 327 (2), 022038.
2. Zamtfort B.S. Dvigatel' s otkryтым rotorom v svete uzhestocheniya trebovaniy po aviaekologii // Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra RAN, 2012, t.14, №6, str.307-308.
3. Open Rotor Engine. Aeroacoustic Technology. Final Report. Continuous Lower Energy, Emissions and Noise (CLEEN) Program. Submitted by General Electric. DOT/FAA/AEE2014-04 /by the FAA's Office of Environment and Energy.
4. Whitfield, S. E., Manl, R., Gillebe, P.R. (1990) High Speed Turboprop Aeroacoustic Study (Counterrotation). Volume I - Model Development. NASA Contractor Report 185241
5. Grinek A.V., Boychuk I.P., Kosolap YU.G. Cifrovoe modelirovanie v zhiznennom cikle izdelij i avtomatizacii tekhnologicheskikh processov sudostroeniya // Eksploataciya morskogo transporta. 2019. № 4 (93). S. 100-114.
6. Truong A., Papamoschou D. Aeroacoustic Testing of Open Rotors at Very Small Scale. AIAA 2013-0217.

УДК 536.2

DOI: 10.34046/aumsuomt102/24

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ВОДНЫХ РАСТВОРОВ ЭЛЕКТРОЛИТОВ ШИРОКОЙ ОБЛАСТИ ПАРАМЕТРОВ СОСТОЯНИЯ

*Ж. Ж. Жумаев, доктор технических наук, профессор, (Республика Казахстан)  
С.Э. Смагулова, преподаватель, (Республика Казахстан)  
Ю.Г. Косолап, кандидат технических наук, доцент  
И.М. Данцевич, кандидат технических наук, доцент*

В статье приводится схема экспериментальной установки, позволяющей проводить исследование коэффициента теплопроводности электролитов в интервале температур до 523 оК и давления до 100Мпа. Особенность конструкции гидравлического пресса заключается в том, что размеры плунжерной пары позволяют создать необходимое давление в автоклаве при любой температуре от 293 оК до 523 оК, без дополнительной подачи исследуемого раствора в систему создания давления. Материал,

из которого изготовлен корпус пресса и плунжерная пара, исключает появление коррозии при взаимодействии их с бинарными и смешанными растворами электролитов. Научный интерес заключается в проверке физической картины и численных результатов расчета температурного поля по длине измерительной ячейки. Представлены результаты моделирования, из которых следует, что максимальные искажения приходятся на область торцевых окончаний внутреннего цилиндра.

**Ключевые слова:** измерительная ячейка экспериментальная установка, теплопроводность электролитов.

## EXPERIMENTAL SETUP FOR RESEARCH THERMAL CONDUCTIVITY OF AQUEOUS SOLUTIONS OF ELECTROLYTES WIDE RANGE OF STATE PARAMETERS

*Z.Z. Zhumaev, S.E. Smagulova, Yu. G. Kosolap, I.M. Dantsevich*

The article provides a diagram of an experimental installation that allows you to study the thermal conductivity of electrolytes in the range of temperatures up to 523 °K and pressure up to 100 MPa. The peculiarity of the design of the hydraulic press is that the dimensions of the plunger pair make it possible to create the necessary pressure in the autoclave at any temperature from 293 oK to 523 oK, without additional supply of the test solution to the pressure generation system. The material, from which the press body and plunger steam are made, eliminates the occurrence of corrosion when they interact with bi-nar and mixed solutions of electrolytes. Scientific interest lies in the verification of the physical picture and the numerical results of calculating the temperature field along the length of the measuring cell. The simulation results are presented, from which it follows that the maximum distortions fall on the area of the end ends of the inner cylinder.

**Keywords:** measuring cell experimental installation, thermal conductivity of electrolytes.

**Введение.** Расчетные возможности уравнений теплопроводности водных растворов электролитов ограничены узким температурным интервалом и в основном при атмосферном давлении. Это говорит о недостаточном объеме существующих экспериментальных данных по теплопроводности электролитов бинарных и смешанных. Ограничены сведения по барическим и концентрационным, температурным зависимостям на теплопроводность растворов электролитов. Исследование теплопроводности водных растворов электролитов в широкой области параметров состояния может определить наиболее эффективные тенденции в обработке экспериментального материала. Оценить влияние катионов и анионов растворенной соли на теплопроводность водных растворов. Уточнить понятие сто процентного гипотетического раствора, не исключая поиск иных форм обработки экспериментальных данных.

**Методы и материалы.** Разработана конструкция экспериментальной установки для исследования теплопроводности растворов электролитов в широкой области параметров состояния. Метод измерения основан на закономерностях стационарного теплового режима. Высокая температура вспышки и вязкостные свойства масла МС-20 позволяют использовать его в интервале температур 293÷523 °К. Точность поддержания температуры в термостате ±0,01°К. Размеры плунжерной пары гидравлического

пресса позволяют создать давление 100Мпа без дополнительного хода плунжера. Материал плунжера и корпуса пресса исключает появление коррозии при взаимодействии с водными растворами электролитов. Из нержавеющей стали выполнены все коммуникации, соединяющие системы создания давления, автоклав. Уменьшения балластных объемов учитывается диаметром трубок.

Моделировалось распределение температуры по длине измерительной ячейки. Из результатов моделирования следует, что максимальные искажения приходятся на область торцевых окончаний внутреннего цилиндра. Изотермы имеют вид кривых, пологая часть которых приходится на область заделки термопар.

Принципиальная схема экспериментальной установки изображена на рис. 1

Основные ее элементы:

- автоклав высокого давления 1 с затвором некомпенсированной площади;
- измерительная ячейка 2, размещенная в автоклаве;
- жидкостной термостат 3.

В систему создания давления входят:

- гидравлический пресс 4 специальной конструкции;
- запорные вентиля высокого давления 8, 9, 10;
- манометр класса точности 0,1.

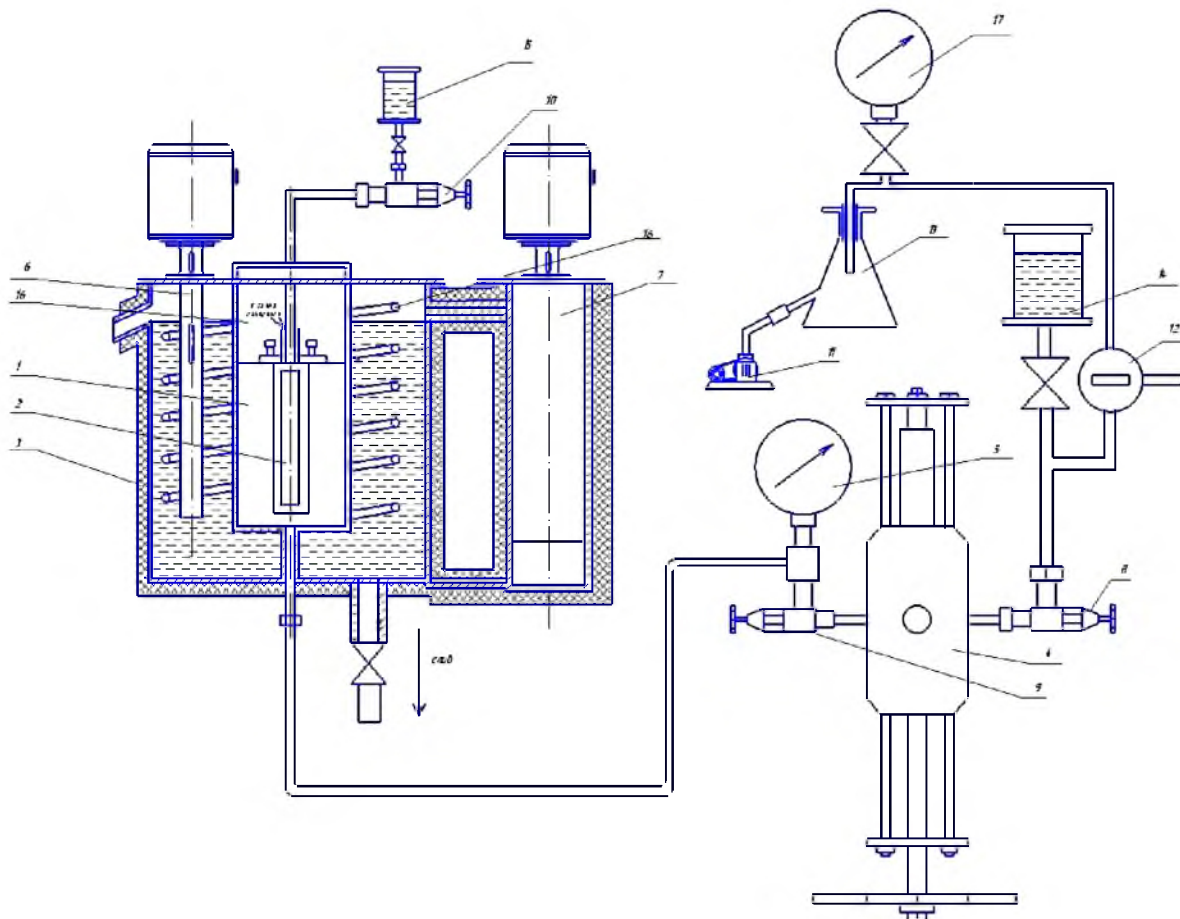


Рисунок 1 - Принципиальная схема экспериментальной установки

Особенность конструкции гидравлического пресса 4 заключается в том, что размеры плунжерной пары позволяют создать необходимое давление в автоклаве при любой температуре от 293 °К до 523 °К, без дополнительной подачи исследуемого раствора в систему создания давления. Материал, из которого изготовлен корпус пресса и плунжерная пара, исключает появление коррозии при взаимодействии их с бинарными и смешанными растворами электролитов. Все узлы системы создания давления, автоклав соединены коммуникациями, выполненными из нержавеющей стали. Для уменьшения балластных объемов, соединительные коммуникации выполнены из трубок диаметром 4 мм с толщиной стенок 1,5 мм.

Система промывки и заполнения исследуемым раствором включает в себя следующие элементы (рис.1):

- вакуумный насос 11;
- вакуумметр 17;
- разделительную колбу 13;
- пробковый кран 12;
- стеклянные сосуды 14, 15.

Соединения между элементами системы промывки и заполнения исследуемым раствором выполнены трубками из нержавеющей стали.

Система термостатирования включает в себя (рис. 1):

- жидкостной термостат 3 объемом 0,75м<sup>3</sup>;
- гильзу 16 с расположенным в ней автоклавом 1;
- два насоса 6,7, обеспечивающих интенсивное перемешивание термостатирующей жидкости;
- теплообменник змеевикового типа для охлаждения водой 16.

Нагрев термостатирующей жидкости осуществляется пятью электрическими нагревателями, размещенными по всему объему термостата.

Схема терморегулирования состоит из регулятора пропорционального типа, технического платинового термометра сопротивления, мостовой схемы регулирующего нагревателя мощностью 400Вт. Данная схема терморегулирования обеспечивает точность поддержания температуры в термостате не хуже  $\pm 0,01$  °К.

Для измерения разности температур  $\Delta t$  в измерительном зазоре и температуры опыта  $t_{\text{абс}}$ . Применяется потенциометр класса 0,002.

Схема измерительной ячейки представлена на рисунке 2.

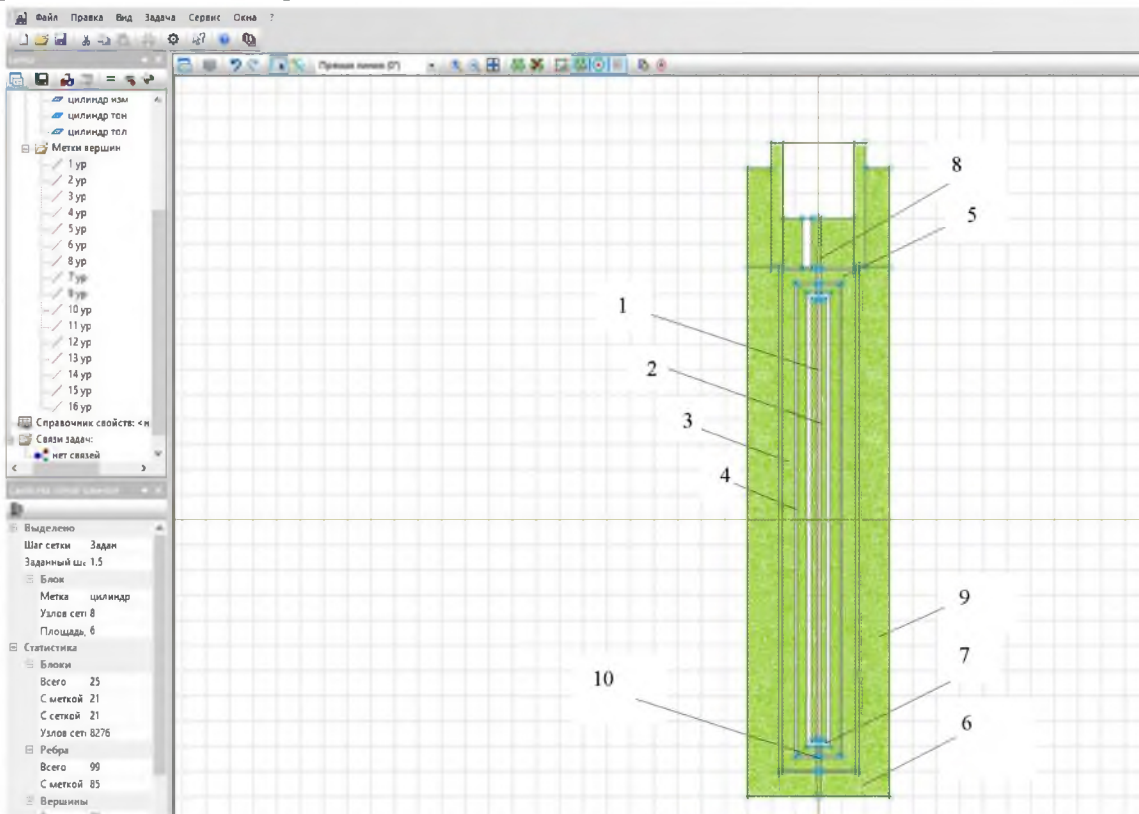


Рисунок 2 – Модель измерительной ячейки с расчётными сетками метода конечных элементов, выполнена в пакете Elcut 6.0

Питание электрического нагревателя, расположенного в измерительной ячейке, осуществляется с помощью стабилизированных источников питания. Измерение мощности, выделенное нагревателем, проводится по обычной схеме с использованием потенциометра класса 0,005, образцовой катушки сопротивления класса 0,01 и делителя напряжения класса 0,005.

Она состоит из двух коаксиально расположенных цилиндров. Цилиндры изготовлены из стали 1X18Н10Т. Выбор материала был определен высокими коррозионными свойствами исследуемых растворов при температуре 523 °К.

Внутренний цилиндр имеет длину  $L = 198,820\text{мм}$  средний диаметр  $d = 19,537\text{мм}$ . По оси внутреннего цилиндра просверлено отверстие  $d = 6\text{мм}$ , в которое установлен электрический нагреватель, помещенный в гильзу 2, выполненную из стали 1X18Н10Т. Нагреватель представляет собой керамическую трубку диаметров 2мм, на которую намотана плотно виток к витку константановая проволока диаметром 0,15мм. Это позволяет создать равномерный тепловой поток во внутреннем цилиндре. Константановая проволока помещена в шелковую изоляцию, которая затем несколько раз пропитывалась

высокотемпературным лаком, что является надежной гарантией предотвращения межвиткового короткого замыкания.

После покрытия высокотемпературный лак подвергался термической обработке. Затем нагреватель шлифовался и тщательно подгонялся по внутреннему диаметру защитной гильзы 2. Это дает надежный тепловой контакт нагревателя с гильзой. К концам нагревателя припаяны потенциальные и токовые отпайки из медного провода диаметром 0,2 мм. Выводы проводов из зоны высокого давления осуществляются с помощью гильзы 2.

Наружный диаметр внутреннего цилиндра был измерен по длине через каждые 10мм в двух взаимно перпендикулярных плоскостях с помощью микроскопа. Аналогично была измерена и длина внутреннего и наружного цилиндров. Предельная погрешность измерения плюс- минус 0,001 мм.

Внутренний цилиндр 1 устанавливается соосно в наружном цилиндре 3. Наружный цилиндр имеет внутренний диаметр  $d = 20,050\text{мм}$ . Соосность достигается шестью центрирующими телами 4 диаметром 1,5 мм, изготовленными из

агата и запрессованными в тело внутреннего цилиндра.

Центрирующие тела расположены в двух сечениях по высоте наружного цилиндра. При запрессовки центрирующих тел тщательно подбирались сверла для обеспечения необходимого натяга между центрирующими телами и цилиндром. Затем центрирующие тела зашлифовались до необходимых размеров. Контроль за высотой центрирующих тел осуществлялся с предельной погрешностью плюс-минус 0,001мм. Все это свело к минимуму эксцентриситет при сборке измерительной ячейки.

На торцах наружного цилиндра установлены плоские крышки. Толщина верхней – 25 мм, нижней – 10 мм. Отверстие 10 служит для заполнения ячейки исследованным раствором. Торцевой зазор между крышками 5,6 устанавливается с помощью агатовых распорок 7. Во внутреннем и наружном цилиндрах имеются отверстия, в которых размещаются гильзы с термопарой.

Для измерения разности температур  $\Delta t$  в слое исследуемого раствора, находящегося в измерительном зазоре, и температуры опыта  $t_{оп}$  использовалась двухспайная дифференциальная медь-константановая термопара с абсолютной

отпайкой. Термоэлектроды термопары изолировались высокотемпературным лаком. Толщина лака подбиралась таким образом, чтобы обеспечить надежный контакт между спаями термопары и гильзы, в которую она помещена. В настоящей конструкции измерительной ячейки термопара и нагреватель не контактируют с исследуемым раствором и не подвержены действию давления. Для уменьшения перетечек тепла по гильзе 2 в зоне выхода ее из внутреннего цилиндра имеется, кольцевая проточка 8, в которую установлен разрезной вкладыш из стали 1X18H10T.

Измерительная ячейка устанавливается в автоклаве 9.

Для проверки физической картины и численных результатов расчета температурного поля по длине измерительной ячейки, методом электротепловых аналогий, моделировалось распределение температуры на интеграторе. На рисунке 3 представлены результаты моделирования, из которых следует, что максимальные искажения приходятся на область торцевых окончаний внутреннего цилиндра. Изотермы имеют вид кривых, пологая часть которых приходится на область заделки термопар.

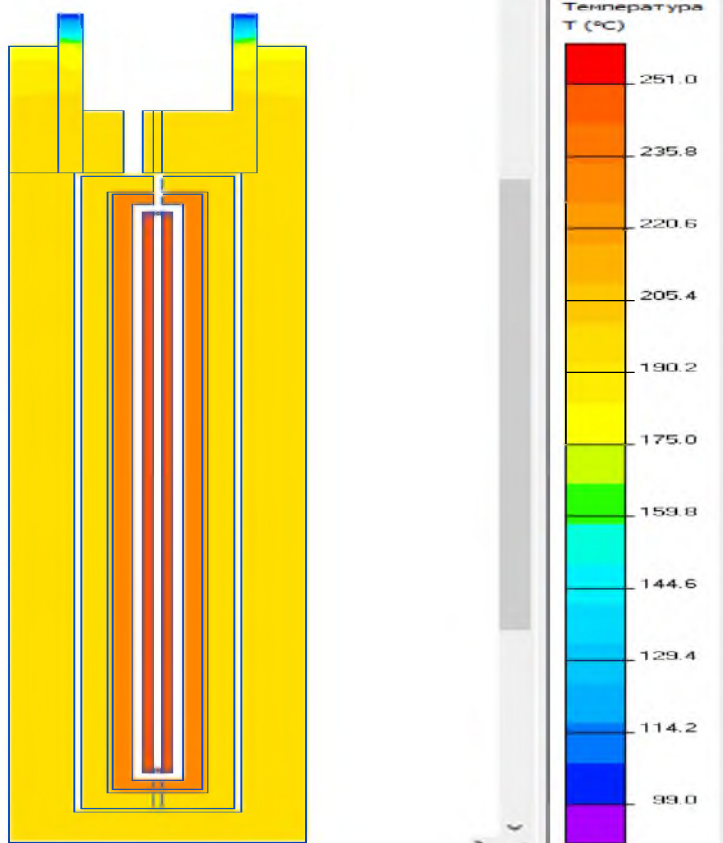


Рисунок 3 – Результат моделирования задачи теплопередачи измерительной ячейки при рабочей температуре 523 К

Первоначальная промывка экспериментальной установки осуществляется смесью петролейного эфира, ацетона и спирта. Последующие промывки – дистиллированной водой при температуре измерительной ячейки 333-343 °К, а после остывания – спиртом. Затем установка вакуумировалась. Заполнение исследуемым раствором осуществляется следующим образом:

1. Кран 12 соединяет вакуумный насос с атмосферой и насос включается.

2. Вентили высокого давления 8 и 9 открываются, вентиль 10 закрывается.

3. При достижении необходимого разряжения (примерно  $10^{-3}$  мм.рт.ст.) закрывается вентиль 8, пробковый кран соединяет вакуумный насос с атмосферой и насос выключается.

4. Вентиль 8 открывается и исследуемый раствор из стеклянного сосуда 14 поступает в пресс 4, затем в автоклав 1 с размещенной в нем измерительной ячейкой 2.

5. О степени заполнения установки можно судить по уровню исследуемого раствора в сосуде 14. По мере уменьшения уровня в сосуде 14 открывается вентиль высокого давления 10, и исследуемый раствор поступает в стеклянный сосуд 15. Затем оба вентиля 8 и 10 закрываются.

После заполнения установки включаются насосы 6, 7, система терморегулирования и установка выводится на нужный температурный режим. При наступлении равновесного состояния, о чем можно судить по постоянству показаний абсолютной термопары, определяется градуировочная поправка  $\Delta\epsilon$  дифференциальной термопары. Затем включается нагреватель, расположенный во внутреннем цилиндре.

При достижении стационарного теплового режима, контролируемого показаниями дифференциальной термопары, проводились измерения следующих величин:

- э.д.с. дифференциальной термопары, мВ;
- э.д.с. абсолютной термопары, мВ;
- падение напряжения на нагревателе, В;
- падение напряжения на образцовой катушке сопротивления, расположенной в цепи нагревателя, [В].

Для снижения величины термо-э.д.с. неомогенности термоэлектроды термопары были отожжены. Для отжига термоэлектродных материалов используется специальная трубчатая печь с равномерным температурным полем. Конструкция печи позволяет производить отжиг в вакууме. Термоэлектроды оджигались в вакууме при температуре 723°К в течение четырех часов.

Градуировка термопары проводится по платиновому термометру сопротивления первого класса.

Измерения поводятся по изотермам начиная с высокого давления и снижения его до атмосферного с шагом по давлению  $P=20$  Мпа.

По методике [1], на описанной установке, был измерен коэффициент теплопроводности воды. Сравнение полученных данных с рекомендуемыми значениями [12] показало хорошее согласие во всем температурном интервале исследований. Это свидетельствует о надежной работе экспериментальной установки.

Особое внимание в статье уделяется разработке конструкции экспериментальной установки для исследования теплопроводности растворов электролитов в широкой области параметров состояния. Представлены результаты моделирования температурного поля по длине измерительной ячейки, из которых следует, что максимальные искажения приходятся на область торцевых окончаний внутреннего цилиндра. Изотермы имеют вид кривых, пологая часть которых приходится на область заделки термопар.

#### Литература

1. Косолап, Ю. Г. Теплопроводность бинарных и смешанных растворов электролитов: Diss. дис. канд. техн. наук, 1990.
2. Лыков, А.В. Теория теплопроводности.– М.: Высшая школа, 1967.– 599 с.
3. Цедерберг, И.В. Теплопроводность газов и жидкостей.– М.: Наука, 1963.– 409 с.
4. Кондратьев, Г.М. Приложение теории регулярного охлаждения двухсоставного шара к определению теплопроводности плоских проводников тепла // Изв. АН СССР. Технические науки. – 1950. – №4. – С. 536.
5. Голубев, И.Ф. Бикалориметр для определения теплопроводности газов и жидкостей при высоких давлениях и различных температурах // Теплоэнергетика. – 1963.– №12. – С.78-82.
6. Мустафаев, Р.А. Теплофизические свойства углеродородов при высоких параметрах состояния.– М.: Энергия, 1980.– 296 с.
7. Michels, A., J. V. Sengers, and P. S. Van der Gulik. "The thermal conductivity of carbon dioxide in the critical region: II. Measurements and conclusions." *Physica* 28.12 (1962): 1216-1237.
8. Амирханов, Х.И. Теплопроводность двуокиси углерода вдоль пограничной кривой и в области критического состояния/ Х.И. Амирханов, А.П. Адамов // Теплоэнергетика. – 1963.– №7.– С. 77-81.
9. Филиппов, Л.П. Исследование теплопроводности жидкостей.– М.: Изд-во МГУ, 1970.–239 с.
10. Сафронов, Г.А. Теплопроводность водных растворов электролитов: дис...канд. техн. наук. - Баку, 1985.– 220 с.

11. Григорьев, Е. Б. Теплопроводность водных растворов солей лантаноидов и галоидов щелочных металлов: дис. – Казанский государственный технологический университет, 2008.
12. Варгафтик, Н. Б. и др. Теплопроводность жидкостей и газов. – М.: Изд-во стандартов, 1978. – Т. 471. – С. 11.
13. Лютикова, М. Н. "Модель влияния оценки трещиноподобных дефектов на прочностные и гидравлические свойства трубопроводов. /Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности.– 2012.– 2.– С. 38-40.
6. Mustafaev, R.A. Teplofizicheskie svojstva uglevodorodov pri vysokih parametroh sostoyaniya.-M.; Energiya, 1980.-296s.
7. Michels, A., J. V. Sengers, and P. S. Van der Gulik. "The thermal conductivity of carbon dioxide in the critical region: II. Measurements and conclusions." Physica 28.12 (1962): 1216-1237.
8. Amirhanov, H.I. Teploprovodnost' dnuokisi ugleroda vdol' pograničnoj krivoj i v oblasti kritičeskogo sostoyaniya./ Amirhanov H.I., Adamov A.P. // Teploenergetika. – 1963. - №7. -s. – 77-81.
9. Filippov, L.P. Issledovanie teploprovodnosti zhidkostej. -M.: Izd-vo MGU, 1970.-239s.
10. Safronov, G.A. Teploprovodnost' vodnyh rastvorov elektrolitov. Dis...kand. tekhn. nauk. - Baku,1985.- 220s.
11. Grigor'ev, E. B. Teploprovodnost' vodnyh rastvorov solej lantanoidov i galoidov shchelochnyh metallov: dis. – Kazanskij gosudarstvennyj tekhnologičeskij universitet, 2008.
12. Vargaftik, N. B. i dr. Teploprovodnost' zhidkostej i gazov //M.: Izd-vo standartov. – 1978. – Т. 471. – С. 11.
13. Lyutikova, M. N. "Model' vliyaniya ocenki treshchinopodobnyh defektov na prochnostnye i gidravlicheskie svojstva truboprovodov. /Avtomatizaciya, telemekhanizaciya i svyaz' v neftjanoj promyshlennosti 2 (2012): 38-40.

#### Reference

1. Kosolap, YU. G. Teploprovodnost' binarnyh i smeshannyh rastvorov elektrolitov. Diss. dis. kand. tekhn. nauk, 1990.
2. Lykov, A.V. Teoriya teploprovodnosti.-M.: Vysshaya shkola, -1967.-599s.
3. Cederberg, I.V. Teploprovodnost' gazov i zhidkostej.-M.: Nauka, -1963.-409s
4. Kondrat'ev, G.M. Prilozhenie teorii reguljarnogo ohlazhdeniya dvuhsostavnogo shara k opredeleniyu teploprovodnosti plohih provodnikov tepla // Izv. AN SSSR. Tekhnicheskie nauki. – 1950. - №4. – s.536.
5. Golubev, I.F. Bikalorimetr dlya opredeleniya teploprovodnosti gazov i zhidkostej pri vysokih davleniyah i razlichnyh temperaturah // Teploenergetika. – 1963. - №12. – s. 78-82.

УДК 621

DOI: 10.34046/aumsuomt102/25

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПРЕИМУЩЕСТВ ПРИМЕНЕНИЯ СЖИЖЕННОГО ПРИРОДНОГО ГАЗА В КАЧЕСТВЕ ОСНОВНОГО ВИДА СУДОВОГО ТОПЛИВА

*В.В. Бочкарев, курсант*

*А.А. Малюта, курсант*

*А.И. Епихин, кандидат технических наук, доцент*

*В.А. Туркин, доктор технических наук, профессор*

*Д.О. Яворская, аспирант*

Данная статья направлена на сравнительный анализ СПГ и МДГ в качестве судового топлива с точки зрения их влияния на окружающую среду. В качестве исследуемого объекта приводится балкер дедвейтом 50000. Цикл каждого вида топлива был распределен в три стадии: Well-to-Tank (WtT), Tank-to-Wake (TtW) и Well-to-Wake (WtW). При моделировании процесса эффект каждой стадии был проанализирован, основываясь на 5 категориях воздействия на окружающую среду. Потенциал Глобального Потепления (GWP), Потенциал Закисления (AP), Фотохимический потенциал (POCP), Потенциал Эвтрофикации (EP) и Твердые Частицы (PM). Результаты анализа показали, что уровни выбросов для СПГ были значительно меньше чем для МДГ во всех категориях. Например, 1 опция оказалась наилучшей с наименьшими показателями уровней выбросов на  $1.0 \cdot 10^7$  МДж расхода топлива: 977 тонн в эквиваленте CO<sub>2</sub> (для GWP), 1.76 тонн SO<sub>2</sub> в эквиваленте (для AP), 1.18 тонн N эквивалента (для EP), 4.28 тонн NMVOC эквивалента (для POCP) и 26 кг PM 2.5 эквивалента (PM). Заключение данной научной статьи является вывод о преимуществах СПГ в отношении влияния на окружающую среду над МДГ.

**Ключевые слова:** СПГ, МДГ, судовое топливо, суда на СПГ, IMO, Выбросы.