



**FAN VA TEXNOLOGIYALAR  
TARAQQIYOTI**

**DEVELOPMENT OF SCIENCE  
AND TECHNOLOGI**

**1**  
**2026**

**Tahririyat hay'ati raisi:**  
**SIDDIQOVA S.G'. –**  
**Buxoro davlat texnika universiteti rektori**

**Muovini:**  
**NIZAMOV A.B. –**  
**BuxDTU ilmiy ishlar va innovatsiyalar bo'yicha prorektori**  
**Tahrir hay'ati:**

**MUQIMOV K.M. –** O'zR FA akademigi (O'zMU)  
**JALILOV A.T. –** O'zR FA akademigi (Toshkent kimyo-texnologiya ITI)  
**NEGMATOV S.N. –** O'zR FA akademigi ("Fan va taraqqiyot" DUK)  
**BAHODIROV G'.A. –** t.f.d., professor, O'zR FA bosh ilmiy kotibi  
**XAMIDOV O.X. –** iqtisod fanlari doktori, professor (BuxDU)  
**JALILOV T.K. –** iqtisod fanlari doktori (DSc), professor (TKTI)  
**PARDAYEVA M.D. –** BuxDTU yoshlar masalalari va ma'naviy-ma'rifiy ishlar bo'yicha birinchi prorektori, falsafa fanlari doktori (DSc)  
**XOJIYEV A.X. –** o'quv ishlari bo'yicha prorektor, texnika f.f.d. (PhD)  
**SAIDOV S.B. –** Buxoro DTU moliya va iqtisod ishlari bo'yicha prorektori  
**QURBONOV J.M. –** texnika fanlari doktori, professor (Samarqand ISI)  
**ADIZOV B.Z. –** texnika fanlari doktori (DSc), pprofessor, O'zRFA UNKI  
**ASTANOV S.X. –** fizika-matematika fanlari doktori, professor  
**RAXMONOV X.Q. –** texnika fanlari doktori, professor  
**VOXIDOV M.M. –** texnika fanlari doktori, professor  
**JO'RAYEV X.F. –** texnika fanlari doktori, professor  
**SADULLAYEV N.N. –** texnika fanlari doktori (DSc), professor  
**MAJIDOV Q.X. –** texnika fanlari doktori, professor  
**FOZILOV S.F. –** texnika fanlari doktori, professor  
**ISABAYEV I.B. –** texnika fanlari doktori, professor  
**ABDURAHMONOV O.R. –** texnika fanlari doktori, professor  
**GAFUROV K.X. –** texnika fanlari doktori (DSc), professor  
**XAYDAROV A.A. –** texnika fanlari doktori (DSc), dotsent  
**JO'RAYEV F.O'. –** texnika fanlari doktori (DSc), professor  
**MURADOVA F.R. –** pedagogika fanlari doktori (DSc), professor  
**JUMAYEV M.R. –** fizika-matematika fanlari doktori (DSc), professor  
**YUNUSOVA G.S. –** falsafa fanlari doktori (DSc), professor  
**BOBOYEV A.Ch. –** iqtisodiyot fanlari nomzodi, professor  
**TO'XTAYEVA Z.Sh. –** texnika fanlari doktori (DSc), professor  
**MAXMUDOV M.J. –** texnika fanlari doktori (DSc), professor  
**HAYITOV R.R. –** texnika fanlari doktori (DSc), professor  
**BOZOROV G'.R. –** texnika fanlari doktori (DSc), professor  
**BOLTAYEV Z.I. –** fizika-matematika fanlari doktori (DSc), professor  
**OLTIYEV A.T. –** texnika fanlari doktori, (DSc)  
**JALILOV R.B. –** texnika fanlari doktori (DSc), professor  
**MAXMUDOV M.I. –** texnika fanlari doktori (DSc), professor  
**MAJIDOVA N.Q. –** texnika fanlari doktori (DSc), professor  
**AXMEDOV V.N. –** texnika fanlari doktori (DSc), professor  
**MAXMUDOV R.A. –** texnika fanlari doktori (DSc), professor  
**PULATOVA M.I. –** fizika-matematika fanlari nomzodi, professor  
**RAHMATOV Sh.A. –** pedagogika fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD)  
**OCHILOV A.R. –** texnika fanlari doktori (DSc), dotsent  
**O'RINOV U.A. –** pedagogika fanlari doktori (DSc), professor  
**PO'LATOVA S.U. –** texnika fanlari doktori (DSc), professor  
**SAMIYEVA Sh.X. –** pedagogika fanlari doktori (DSc), professor  
**TESHAYEV M.X. –** fizika-matematika fanlari doktori (DSc), professor  
**XAITOV V.U. –** iqtisodiyot fanlari doktori (DSc), dotsent  
**XOJIYEV Sh.M. –** texnika fanlari doktori (DSc), dotsent  
**XAYITOV Sh.N. –** iqtisodiyot fanlari doktori (DSc), dotsent  
**ZOIROV E.X. –** falsafa fanlari doktori (DSc), dotsent  
**NARZIYEV M.S. –** texnika fanlari doktori (DSc), dotsent  
**NAMAZOVA N.J. –** iqtisodiyot fanlari b.f.d. (PhD), dotsent

**Bosh muharrir: DO'STOV H.B. –** kimyo fanlari doktori, professor

**Muharrirlar: Artikova M.M., Istamova G.X.**  
**Musahhih: Barakayeva D.F.**

**FAN VA TEXNOLOGIYALAR**  
**TARAQQIYOTI**  
**ILMIY-TEXNIKAVIY JURNAL**

**DEVELOPMENT OF SCIENCE**  
**AND TECHNOLOGY**  
**SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL**

*Jurnal O'zbekiston matbuot va axborot agentligi Buxoro viloyati boshqarmasida 2014 yil 22-sentyabrda № 05-066-sonli guvohnoma bilan ro'yxatga olingan*

*Muassis:*  
*Buxoro davlat texnika universiteti*

*Jurnal O'zbekiston Respublikasi Vazirlar Mahkamasi huzuridagi OAK Rayosatining 2017 yil 29-martdagi №239/5-sonli qarori bilan dissertatsiyalar asosiy ilmiy natijalarini chop etish tavsiya etilgan ilmiy nashrlar ro'yxatiga kiritilgan. 2019 yilda O'zbekiston Respublikasi OAK Rayosatining qarorlari bilan qayta ro'yxatdan o'tkazilgan.*

*Tahririyat manzili:*  
*200117, Buxoro shahri, Q. Murtazoyev ko'chasi, 15-uy, Buxoro davlat texnika universiteti*

*Tel: 0(365) 223-92-40*

*Faks: 0(365) 223-78-84*

*E-mail: [fantt\\_jurnal@umail.uz](mailto:fantt_jurnal@umail.uz)*

*Jurnalning to'liq elektron varianti bilan <http://journal.bstu.uz> sayti orqali tanishish mumkin.*

*Ushbu jurnalda chop etilgan materiallar tahririyatning yozma ruxsatisiz to'liq yoki qisman chop etilishi mumkin emas. Tahririyatning fikri mualliflar fikri bilan har doim ham mos tushmasligi mumkin. Jurnalda yoritilgan materiallarning haqqoniyligi uchun maqolalarning mualliflari va reklama beruvchilar mas'uldirlar.*

# MUNDARIJA – СОДЕРЖАНИЕ – CONTENT

<b>TEXNIKA, TEXNOLOGIYA VA JIHOZLAR</b>	
<b>Normayev Q.H., Pardayeva Sh.S., Pirnazarov Sh.V., Ashirova M.R., Jalg‘asova G.S.</b> Burg‘ilash mashinalari va ularning mexanizmlarini samarali qayta tiklash texnologiyalari. . . . .	<b>5</b>
<b>Azamjonov R.S.</b> Eksploatatsiyadagi avtoyo‘l ko‘priklarining yuk ko‘tarish qobiliyatini oshirish usulini takomillashtirish . . . . .	<b>11</b>
<b>Xolmuxammadiyev A.M., Toshev Sh.O.</b> Burg‘ulash eritmasidan markazdan qochma separator yordamida yengillashtirilgan eritma tayyorlash texnologiyasi . . . . .	<b>15</b>
<b>Джураев Х.Ф., Ўктамova Ш.Х.</b> Қовоқ уруғи қобиғининг синдириш кучларини аниқлаш методикаси . . . . .	<b>20</b>
<b>Mansurov O.A.</b> Improving the drying process of fruits using convective method. . . . .	<b>24</b>
<b>Jo‘rayev F.O‘., Jo‘rayev A.A., Saidova G.K.</b> Uneversal qurilmaning yumshatuvchi ish oraganining parametrlarini uning ish ko‘rsitkichlariga ta’siri. . . . .	<b>27</b>
<b>Авлиякулов Н.Н.</b> Достижение качества измерительных процессов при метрологическом обеспечении производства . . . . .	<b>32</b>
<b>Do‘stov H.B., Rahimov B.R., Savriyev F.A.</b> Suvlangan gaz quduqlarini qayta ishga tushirish texnologiyasini takomillashtirish tahlili. . . . .	<b>36</b>
<b>KIMYO VA KIMYOVIY TEXNOLOGIYALAR</b>	
<b>Toshboyev S.O‘., Panoyev E.R., Hasanov Z.Z.</b> Gazlarni tozalashda qo‘llaniluvchi absorbentlarning tavsifi va unda hosil bo‘ladigan ko‘piklanish sabablari. . . . .	<b>43</b>
<b>Умаров С.Х., Рустамов В.Дж., Халлоков Ф.К., Ходжаев У.О., Нарзуллаева З.М.</b> Механизм отрицательной фотопроводимости в TiGaSe <sub>2</sub> . . . . .	<b>47</b>
<b>Фозилов Х.С., Туробжонов С.М., Фозилов С.Ф.</b> Маҳаллий иккиламчи хом ашё – куйи молекулали полиэтиленни оксидлаб синтетик юқори ёғ кислоталари олиш ва уларнинг физик-кимёвий хоссалари. . . . .	<b>52</b>
<b>Абдирахимов И.Э.</b> Способы предотвращения образования гидрата при переработке газов. . . . .	<b>57</b>
<b>Alinazarov A.X., Shariboyev N.Y., Jo‘raxanov D.M.</b> Anaerob parchalanish jarayonida harorat barqarorligining metanogen bakteriyalar faolligiga ta’siri va uni quyoshli issiqlik tizimi orqali ta’minlash. . . . .	<b>61</b>
<b>Abdirakhimov I.E.</b> Anticorrosion properties of copper phosphide. . . . .	<b>66</b>
<b>Norqulov J.F., Ibodullayev M.X., Abduraxmonov O.R., Kodirov O.Sh.</b> Amin eritmalarini issiqlikka bardoshli tuzlardan tozalash jarayonini modellashtirish. . . . .	<b>72</b>
<b>Абдирахимов И.Э., Буранов Ф.Э., Курбанов А.Т.</b> Исследование технологических параметров, рекомендованных для синтеза этилена из метана. . . . .	<b>79</b>
<b>Rahimov B.R.</b> Yuqori qatronli neftlarning qovushqoqligini pasaytiruvchi depresantlar kompozitsiyasini ishlab chiqish. . . . .	<b>86</b>
<b>Эшдавлатова Г.Э., Камолов Л.С.</b> Определение концентрации диэтанолamina титриметрическим методом . . . . .	<b>91</b>
<b>Rahimov B.R.</b> Qoldiq neftlarni olishda chuqurlik nasos qurilmasini takomillashtirishning dolzarb muamolari. . . . .	<b>96</b>
<b>Yuldashev T.R., Buronov F.E., Hafizov S.Sh.</b> Tabiiy gazning tarkibidagi zaharli komponentlarni aminlar yordamida tozalash jarayonlari. . . . .	<b>100</b>

## MASHINASOZLIK VA ENERGETIKA

<b>Bafoyev D.X.</b> Detallar sirtini plastik deformatsiyalash va bir tekis mikrorelefnı shakllantirish	<b>107</b>
<b>Majitov J.A.</b> Bioreaktor devorining turli sirtlarida issiqlik berish koeffitsiyentlarini hisoblash va tahlil etish. . . . .	<b>112</b>
<b>Azamov S.S.</b> Uch fazali tok o'zgartkichlari yordamida asinxron motorlarni himoya qilish tizimi tatqiq etish. . . . .	<b>118</b>
<b>Maxmudov M.I., Qo'shshayeva M.R., Nurov S.S., Timirov H.N., Sayfiyev H.O.</b> Quyosh panellarining samaradorligiga changlanganlikning ta'sirini o'rganish bo'yicha ilmiy tadqiqotlar tahlili. . . . .	<b>122</b>
<b>Атауллаев А.О.</b> Исследование и разработка виброустойчивых инклинометрических преобразователей для систем контроля и управления. . . . .	<b>128</b>
<b>Tovboyev A.N., Tog'ayev I.B.</b> Tojlanish jarayonining yuqori kuchlanishli havo liniyalaridagi quvvat yo'qotishlariga ta'sirini baholash. . . . .	<b>135</b>
<b>Murodov K.J.</b> Ko'p qavatli binolarning vertikal chiqindi quvurlaridagi suyuqlik oqimlaridan elektr energiya hosil qilish. . . . .	<b>141</b>
<b>Xamroyev X.X.</b> Mexanik ishlov berishda sirt qatlamining mexanik xususiyatlari. . . . .	<b>145</b>
<b>Tojimurodov D.D.</b> Asinxron motorlarni nosimmetrik rejimlari. . . . .	<b>149</b>
<b>Sadullayev N.N., Nematov Sh.N., To'xtayev Sh.B., Soliyeva Z.N., Murtazoyev F.F.</b> O'zbekistonda quyosh sovtutish tizimlari va ularning texnik imkoniyatlari. . . . .	<b>154</b>

## INFORMATIKA VA AXBOROT – KOMMUNIKATSION TIZIMLAR

<b>Babomuradov O.J., Kuyliyeva F.A.</b> Statistical analysis of social network messages. . . . .	<b>163</b>
<b>Madaminov U.A., Qodirov D.R.</b> Katta hajmli ma'lumotni parallel qayta ishlashda Hadoop MapReduce tizimini qo'llash. . . . .	<b>168</b>
<b>Каххоров М.М.</b> Моделирование ветровой турбины типа Дарье и обоснование её параметров в системе Ansys Fluent. . . . .	<b>173</b>
<b>Maxmudov M.Sh.</b> Relief morfometrik ko'rsatkichlari asosida marshrutlashning model va algoritmlari. . . . .	<b>179</b>

## OZIQ-OVQAT SANOATI TEXNOLOGIYALARI

<b>Ravshanov S.S., Botirov M.Sh., Ergashev A.M., Mirzaev J.D., Shodmonqulova Q.</b> Quruq iqlimda yetishtirilgan bug'doy donini ochiq omborlarda saqlashning mahsulot xossalariga ta'siri. . . . .	<b>184</b>
<b>Sharipov N.Z., Qo'ldosheva F.S.</b> Gilos danagidan moy olish jarayonini infraqizil nurlar yordamida jadallashtirish. . . . .	<b>187</b>
<b>Шарипов Н.З.</b> Интенсификация процесса получения масла из ядра косточек вишни в поле сверхвысокочастотного тока. . . . .	<b>190</b>
<b>Баракаев Н.Р., Шукуров Ю.У.</b> Мева ва сабзавотларни сублиматия йўли билан қуритишнинг илмий асослари. . . . .	<b>194</b>
<b>Ibragimov R.R., Sharipov N.Z.</b> Bodringni konservalash jarayonida noan'anaviy usulda issiqlik ishlov berish jarayonini nazariy asoslari. . . . .	<b>199</b>
<b>Kuliyev N.Sh.</b> Meva va sabzavot sharbatlarini ko'pirtirishda ko'pik hosil qilish va emulgirlash xususiyatlarining dinamikasi. . . . .	<b>203</b>
<b>Мухамедова М.Э.</b> Разработка рецептуры диабетических сдобных сухарей с использованием синергии растительных компонентов . . . . .	<b>209</b>
<b>Хужакулов У.К., Мажидова Н.К., Мажидов К.Х.</b> Исследование показателей качества местных сортов овощной продукции длительного хранения. . . . .	<b>220</b>

<b>Файзиев А.А., Ахмедов В.Н., Кедельбаев Б.Ш.</b> Технология приготовления натурального мясного полуфабриката ферментированного бифштекса . . . . .	<b>227</b>
<b>TO‘QIMACHILIK VA YENGIL SANOAT TEXNOLOGIYALARI</b>	
<b>Ramazonov S.S., Ismoyilov F.B.</b> Tola sifatini yaxshilash va tozalash maqsadida jinlash mashinasini ishchi qismlarini takomillashtirish. . . . .	<b>233</b>
<b>Muxitdinova M.A., Bebutova N.N.</b> Milliylik va zamonaviylik uyg‘unligi: O‘zbek libos dizaynida yangi yo‘nalishlar. . . . .	<b>237</b>
<b>Nematova L.X., Qodirova D.X.</b> Yoshi katta ayollar fe‘l atvori belgilari bo‘yicha iste‘molchilarning tipologik xususiyatlarini aniqlash. . . . .	<b>242</b>
<b>Saidova A.S., Saidova G.Sh., Fayzilloyeva N.B.</b> Tikuv mashinasining tahlama qurilmadagi taxlam hosil qilishda takomillashgan tahlam berishdagi tishlarini turli ko‘rinishda choklarga ta‘siri. . . . .	<b>246</b>
<b>Совутов М.Э., Мусаев Н.М., Холиқов К.М., Муқимов М.М.</b> Иссиқлик сақлаш хусусияти юқори бўлган трикотаж тўқималарининг физик-механик кўрсаткичлари тадқиқи . . . .	<b>251</b>
<b>Shodmonova M.S.</b> Elastikligi yuqori bo‘lgan polimer kompozitsiya olish usulini ishlab chiqish . . . . .	<b>258</b>
<b>Садуллаева Д.А.</b> Современные материалы: Хан-атлас – традиция и инновация. . . . .	<b>261</b>
<b>Джурраев А., Росулов Р.Х., Пардаев Б.Ч., Имомназаров М.С.</b> Пахтани майда ифлосиклардан тозалагичнинг самарали конструкцияси. . . . .	<b>267</b>
<b>Aliyev Sh.B.</b> Tikuv mashinasining tishli reykasini lazer nuri yordamida termik ishlov berishning matematik modeli. . . . .	<b>270</b>
<b>Musayev S.S., Qodirov T.J.</b> Reseptura ko‘rsatkichlarining poliolefin va etilenpropilen kauçhugi asosidagi poyabzal kompozitsiyalarining iste‘mol va texnologik xususiyatlariga ta‘siri. . . . .	<b>275</b>
<b>Amonov A.R., Muxammedjanov M.M.</b> Tikuv mashinasi qavariq rezinali vtulkali qayishqoq tayanchlarga o‘rnatilgan bosh vali tebranish amplitudasi tahlili. . . . .	<b>281</b>
<b>Berdimuratov U.T., Rosulov R.X., Pardayev B.Ch.</b> Arrali jinlar konstruksiyasi, asosiy ishchi organlari, ishlash jarayoni. . . . .	<b>284</b>
<b>Muxammedova M.O., Axmedov J.J.</b> O‘smirlar uchun soddalashtirilgan ortopedik poyabzal elementlarining konstruktiv yechimlarini ishlab chiqish. . . . .	<b>286</b>
<b>Temirova G.I., Shodmonova M.S.</b> Polimer kompozitsiya asosida ko‘p qatlamli mo‘ynali paketlar tayyorlash texnologiyasi. . . . .	<b>291</b>
<b>Saidova X.X., Murodova Z., Ulugova N.</b> 3D va ko‘p o‘lchovli geometrik yondashuvlar asosida bolalar kiyimini konstruktiv loyihalash. . . . .	<b>295</b>
<b>Kuliyeva D.R.</b> Bazalt mato qo‘llanilgan maxsus kiyim turini tanlash va konstruksiyasini ishlab chiqish . . . . .	<b>299</b>
<b>Sharipov J.O., Sayitqulov S.O., Begmurodov A.F.</b> Detallarni yeyilishi va korroziyalanishiga asosiy sabablar hamda ulardan himoyalaniş. . . . .	<b>306</b>
<b>Toshpulotov L.I., Xamrayeva S.A.</b> Turli o‘rilishli ikki qatlamli ko‘ylakbop matolarning mexanik va deformatsion xususiyatlarining o‘zgarishi. . . . .	<b>309</b>
<b>Sayitqulov S.O., Razzoqov R.R.</b> Paxtani mayda iflosliklardan tozalash mashinasining yangi konstruksiyasini ishlab chiqish. . . . .	<b>314</b>
<b>Qodirova S.X.</b> Ayollar ustki liboslari bo‘yicha istiqbolli moda yo‘nalishlarini tahlil qilish . . . . .	<b>318</b>
<b>Каримова Н.Х.</b> Оценка свойств двухслойных трикотажных тканей на основе структурного и механического анализа противостоячивости к трению и разрывного удлинения . . . .	<b>322</b>
<b>Maxmudova X.M.</b> Paxta quritishning ahamiyatliligi va undagi texnik muammolar. . . . .	<b>326</b>
<b>Behbudov Sh.H., Samadova M.O.</b> Ip va matoga ta‘sir etuvchi tashqi kuchlar asosida tikuv mashinasi bo‘g‘inlarining harakat tenglamalarini tahlil qilish. . . . .	<b>332</b>

<b>Шопулатов А.А., Райимкулов Ж.К., Бердимуратов У.Т., Росулов Р.Х.</b> Пахтани майда ифлосликлардан тозалашда қозикчали-планкали барабан планкаларининг таъсири . . . . .	<b>336</b>
<b>Sultonov M.M., Aloxodjayev A.M., Mirzaaxmedova D.Yu.</b> Takomillashtirilgan tozalash qurilmasining texnologik parametrlarini tadqiq qilish. . . . .	<b>340</b>
<b>Azimova G.A., Shokirov L.B.</b> Mahalliy xomashyolarga asoslangan yarim jun to‘qimalar ishlab chiqishning dolzarb masalalari. . . . .	<b>350</b>
<b>Agzamova S.M., Gulyayeva G.X., Mukimov M.M., Karimova N.H.</b> Turli xomashyoli ikki qatlamli trikotaj to‘qimalarining sifat ko‘ratkichlarini kompleks baholash. . . . .	<b>354</b>
<b>ANIQ VA IJTIMOIIY-IQTISODIY FANLAR</b>	
<b>Mannonov Y.O.</b> Kitobxonlik madaniyatini oshirishning ayrim masalalari. . . . .	<b>360</b>
<b>Мухамадиев Б.Т, Мухамадиева З.Б., Джамалов С.Ш.</b> Значение сбалансированного кишечного микробиома в укреплении физического и психологического здоровья . . . . .	<b>363</b>
<b>Xakimova M.Y.</b> Elektron kutubxonani yaratishda zamonaviy dasturiy-texnik ta’minot . . . . .	<b>372</b>
<b>Шарипов М.З., Назаров Э.С., Зокирова З.М., Иброхимова С.Ш., Муминов Ш.Х.</b> Структура и свойства одномерных микромагнитных конфигураций в ферромагнитных кристаллах. . . . .	<b>375</b>
<b>EKOLOGIYA VA ATROF MUHIT MUHOFAZASI</b>	
<b>Мамедов Р.А., Жамолов Ж.Ж.</b> Оценка низконапорного гидроэнергетического потенциала водозаборных сооружений и ирригационных каналов. . . . .	<b>381</b>
<b>Мамедов Р.А.</b> Исследование зависимости выхода водорода от термохимических характеристик электролита в процессе электролиза. . . . .	<b>391</b>

4. Kumar A., Patel R., Gupta S. «Renewable Energy and Climate Mitigation», *Energy Systems Research*, 2022, Vol. 8, No. 1, pp. 45-61.
5. REN21. *Global Status Report on Renewables*, 2021, REN21 Secretariat, Paris, pp. 1–300.
6. IRENA. *Employment and Economic Impact of Renewables*, 2020, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, pp. 1-120.
7. Paish O. «Small Hydro Power: Technology and Status», *Renewable Energy*, 2018, Vol. 10, No. 3, pp. 345-358.
8. Zhang L. «Environmental Impact of Large Dams», *Hydropower Review*, 2017, Vol. 5, No. 2, pp. 99-112.
9. Vassilios P. «Constraints of Large Hydropower Expansion», *Journal of Water Resources*, 2020, Vol. 14, No. 1, pp. 25-37.
10. Karimov R., Mamatov B. «Assessment of Hydropower Potential in Irrigation Networks», *Central Asian Water Journal*, 2021, Vol. 3, No. 2, pp. 82-94.
11. Нестеров С.А., Малюгин С.М. *Малые гидроэлектростанции: расчёт и проектирование*. М.: Энергоатомиздат, 2018, с. 1-320.
12. Лубенец Б.В. *Гидравлика и энергетика водотоков*. СПб.: Гидрометиздат, 2015, с. 1–280.
13. ГОСТ 8.586.2–2005. *Измерение расхода воды в открытых руслах*. М.: Стандартинформ, 2005, 38 с.
14. Paish O. “Small Hydropower: Technology and Current Status”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2002, Vol. 6, No. 6, pp. 537-556.
15. Williams A. “Low-head Hydropower Technologies”, *International Journal of Hydropower & Dams*, 2014, Vol. 21, No. 4, pp. 72-82.
16. Fraenkel P. *Water Lifting Devices and Low-head Hydropower*. FAO Irrigation and Drainage Paper, UN FAO, 2010, pp. 1-240.

Мамедов Расул Акиф-огли - доцент кафедры «Электрическая и энергетическая инженерия», Бухарского государственного технического университета, Тел: (+99893) 960-93-39, e-mail: [rasul\\_91-92@mail.ru](mailto:rasul_91-92@mail.ru)

Жамолов Жабборшоҳ Жахонгир угли - базовый докторант кафедры «Электрическая и энергетическая инженерия», Бухарского государственного технического университета

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ВЫХОДА ВОДОРОДА ОТ ТЕРМОХИМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРОЛИТА В ПРОЦЕССЕ ЭЛЕКТРОЛИЗА

Мамедов Р.А.

*Бухарский государственный технический университет.*

**Аннотация.** В работе рассмотрено влияние термодинамических характеристик электролита - температуры, теплоёмкости, теплопроводности, вязкости и электропроводности - на эффективность электролиза воды и выход водорода. Проведён анализ современных исследований для щелочных (АВЕ), протон-обменных (РЕМ) и твердооксидных (SOEC) электролизёров, выявлены зависимости выхода H<sub>2</sub> от состава и температуры электролита. Установлено, что оптимальные условия обеспечиваются при температуре 60-70 °С для щелочных и 50-80 °С для РЕМ-систем при концентрации 20-35 % КОН или NaOH. Показано, что комплексная оптимизация химического состава и температурного режима электролита позволяет повысить выход водорода на 10-25 %, снизить энергопотребление на 8-15 % и увеличить долговечность ячейки на 20-30 %. Сформулированы рекомендации по подбору параметров электролита, направленные на повышение энергоэффективности и устойчивости водородных технологий.

**Ключевые слова:** водород, электролиз воды, термодинамические характеристики, электролит, электропроводность, температура, щелочной электролиз, РЕМ-электролиз, энергоэффективность, теплоёмкость, теплопроводность.

## STUDY OF THE DEPENDENCE OF HYDROGEN OUTPUT ON THE THERMOCHEMICAL CHARACTERISTICS OF THE ELECTROLYTE IN THE ELECTROLYSIS PROCESS

Mamedov R.A.

*Bukhara state technical university.*

**Abstract.** The paper examines the effect of the thermochemical characteristics of the electrolyte - temperature, heat capacity, thermal conductivity, viscosity, and electrical conductivity - on the efficiency of water electrolysis and hydrogen production. An analysis of recent studies on alkaline (AWE), proton exchange membrane (PEM), and solid oxide (SOEC) electrolyzers was conducted, revealing correlations between H<sub>2</sub> yield, electrolyte composition, and temperature. It was found that optimal conditions are achieved at 60-70 °C for alkaline and 50-80 °C for PEM systems with an electrolyte concentration of 20-35% KOH or NaOH. The comprehensive optimization of the electrolyte's chemical composition and temperature regime increases hydrogen yield by 10-25%, reduces energy consumption by 8-15%, and extends cell lifetime by 20-30%. Recommendations are proposed for selecting electrolyte parameters to enhance the energy efficiency and stability of hydrogen technologies.

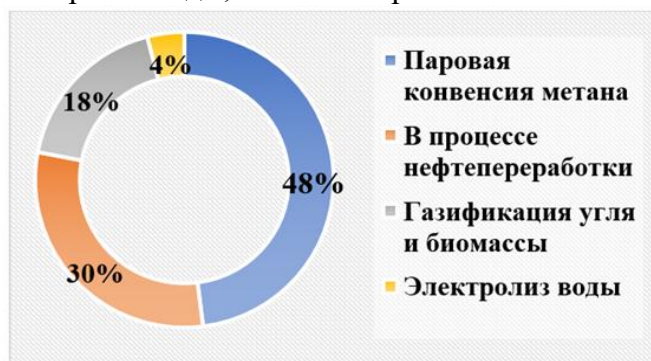
**Keywords:** hydrogen, water electrolysis, thermochemical characteristics, electrolyte, electrical conductivity, temperature, alkaline electrolysis, PEM electrolysis, energy efficiency, heat capacity, thermal conductivity.

**Введение.** В мире, где обеспечение потребителей надёжным и экологически чистым энергоснабжением становится одной из ключевых задач XXI века, особое внимание уделяется возобновляемым источникам энергии (ВИЭ) как инструменту решения экологических проблем и обеспечения удалённых регионов, лишённых доступа к централизованным энергосетям [1]. Развитие солнечных, ветровых и гидроэнергетических технологий позволяет создавать автономные энергосистемы, способные не только вырабатывать электроэнергию, но и производить топливо будущего - водород.

В настоящее время водород получают преимущественно четырьмя методами [2]: паровой конверсией метана, обеспечивающей около 48 % мирового производства, побочными процессами нефтепереработки около 30 %, газификацией угля около 18 % и электролизом воды, доля которого пока не превышает 0,1 % от глобального объёма [3]. На рисунке 1 показана мировая структура производства водорода по методам.

Среди указанных технологий именно электролиз воды, особенно при питании от ВИЭ, обеспечивает производство так называемого *зелёного водорода*, не сопровождающееся выбросами CO<sub>2</sub> на этапе генерации [4]. По данным IEA, в 2023 году глобальное производство зелёного водорода составило около 0,5 млн тонн, однако при реализации заявленных проектов мощность установленных электролизёров может достичь 560 ГВт к 2030 году, что позволит производить до 50 млн тонн в год [5].

Актуальность развития технологий электролиза обусловлена возможностью интеграции в автономные и распределённые энергосистемы, питаемые от солнечных и ветровых станций, что особенно важно для отдалённых территорий и островных государств [6]. При этом эффективность электролиза во многом определяется не только источником питания и типом электролизёра, но и составом электролита, его термохимическими характеристиками - теплоёмкостью, теплопроводностью, вязкостью и температурой плавления, которые оказывают прямое влияние на скорость протекания электрохимических реакций, распределение тепла в системе и, как следствие, на выход водорода [7]. На рисунке 2 показана схема принципа работы электролизной установки, питаемой от ВИЭ.



**Рис. 1. Распределение методов получения водорода по доле в мировом производстве**



**Рис.2. Принципиальная схема электролизной установки для производства водорода с использованием возобновляемых источников энергии**

Современные исследования [8-10] показывают, что оптимизация состава и термохимических характеристик электролита позволяет снизить перенапряжение электродных реакций, уменьшить энергозатраты и увеличить выход водорода. Таким образом, анализ зависимости выхода водорода от состава и свойств электролита является важным шагом на пути повышения эффективности зелёных водородных технологий и расширения их применения в мировой энергетике.

**Целью исследования** является определение зависимости выхода водорода от термохимических характеристик электролита в процессе электролиза, а также выявление оптимальных условий, обеспечивающих максимальную эффективность процесса.

**Задачи исследования** направлены на комплексное изучение влияния термохимических характеристик электролитов на процесс электролиза. В рамках работы планируется провести обзор существующих теоретических и экспериментальных данных, классифицировать и описать типы электролитов, используемых в исследованиях, их состав и физико-химические свойства. Особое внимание уделяется определению зависимости скорости электролиза и выхода водорода от температуры, а также исследованию влияния теплоёмкости, теплопроводности и электропроводности электролита на общую эффективность процесса. На основе полученных результатов будут сформулированы рекомендации по выбору оптимальных параметров электролита, направленные на повышение производительности и энергетической эффективности электролизной установки.

**Обзор теоретических и экспериментальных исследований.** Ведртнам А. и др. провели теоретико-экспериментальное исследование влияния термохимических свойств электролитов на эффективность водородного электролиза [11]. Модель учитывала тепловые потоки, электропроводность, вязкость и теплоёмкость раствора при 20-80 °С. Показано, что повышение температуры до 60-70 °С снижает внутреннее сопротивление на 12-18 % и увеличивает выход водорода на 10-14 % благодаря улучшению ионного переноса. Электролиты с более высокой теплоёмкостью и теплопроводностью обеспечивают равномерное распределение температуры и уменьшают потери энергии. Авторы отмечают, что контроль термохимических параметров электролита является ключевым фактором повышения эффективности зелёного водорода при питании от ВИЭ.

Туйсух Х. и др. провели обзор технологий щелочного электролиза воды с акцентом на производство «зелёного» водорода и рассмотрели влияние состава и характеристик электролита на эффективность процесса [12]. Авторы отмечают, что для щелочных электролизёров используются растворы NaOH или KOH с концентрацией обычно 20-40 % и температурой 50-80 °С. Увеличение температуры электролита снижает внутреннее сопротивление и улучшает ионную проводимость, что способствует росту выхода водорода.

Наряду с этим высокая концентрация электролита улучшает электропроводность, но может повышать вязкость и вызывать рост омических потерь и коррозии электродов. Авторы подчёркивают, что контроль таких термохимических параметров, как температура, вязкость и электропроводность раствора, является ключевым для достижения энергоэффективности электролиза и масштабирования производства водорода.

Чатенет М. и др. выполнили фундаментальный обзор технологий водородного электролиза, начиная с учебных материалов и заканчивая новейшими научными стратегиями и промышленными реализациями [13]. В данном исследовании особое внимание уделяется влиянию параметров электролита - температуры, вязкости, электропроводности и теплопроводности - на эффективность электролиза. Установлено, что повышение температуры снижает внутреннее сопротивление ячейки и ускоряет ионный перенос, однако чрезмерный нагрев ухудшает стабильность электродов. Также показано, что состав электролита и природа растворённых ионов влияют на перенапряжение, распределение тепла и образование пузырьков, что напрямую связано с термохимическими свойствами раствора. Комплексная оптимизация этих характеристик определяет повышение энергоэффективности и долговечности электролизёров.

Парех А. и др. выполнили анализ влияния термохимических характеристик электролита на эффективность PEM-электролизёров [14]. В данном исследовании особое внимание уделяется зависимости выхода водорода от таких параметров, как теплопроводность, теплоёмкость, вязкость и химическая стабильность электролита. Установлено, что при повышении температуры электролита в диапазоне 100-180 °C наблюдается увеличение ионной подвижности и снижение внутреннего сопротивления ячейки, что способствует росту производительности водорода на 15-25%. Однако при достижении критических температур свыше 200 °C термодеструкция мембраны и деградация катализатора снижают выход H<sub>2</sub>. Авторы подчёркивают, что оптимальный тепловой режим электролита должен обеспечивать равновесие между повышением проводимости и предотвращением перегрева. Также показано, что электролиты с высокой теплоёмкостью и стабильными протонными каналами позволяют поддерживать устойчивый выход водорода при длительной работе установки.

Фент Й. и др. представили исследование, посвящённое влиянию термохимических свойств электролита на кинетику электролиза воды в щелочных системах [15]. В работе особое внимание уделяется зависимости выхода водорода от теплоёмкости, вязкости и теплопроводности раствора КОН при температурах 40-90 °C. Экспериментальные данные показали, что повышение температуры приводит к снижению перенапряжения на катоде и росту выхода H<sub>2</sub> до 28%, однако при концентрации электролита выше 8 М наблюдается увеличение вязкости и ухудшение теплообмена, что ограничивает эффективность процесса. Установлено, что оптимальные термохимические параметры обеспечивают стабильность газовыделения и минимальные тепловые потери при длительной эксплуатации. Авторы отмечают, что регулирование теплового режима электролита - ключевой фактор повышения эффективности промышленных электролизёров.

Чжао Х., Ю. представили параметрическое исследование эффективности щелочного электролиза воды (AWE) с учётом термохимических параметров электролита [16]. В исследовании была разработана двухмодельная методика, связывающая напряжение ячейки с электролитной проводимостью, температурой и вязкостью раствора. Показано, что при повышении температуры электролита с 40 °C до 70 °C выход водорода увеличивался на 12-18 % благодаря снижению сопротивления и улучшению ионного переноса. Одновременно было отмечено, что увеличение концентрации щелочи повышало электропроводность, но также могло увеличивать вязкость и ухудшать теплоотвод, что ограничивало дальнейший рост производительности. Авторы подчёркивают, что оптимизация термохимической

структуры электролита - ключевой путь к повышению эффективности «зелёных» электролизёров.

Сингх Р., Патель Д., Кумар С. представили экспериментальное исследование влияния термодимических свойств электролита на производительность протон-обменных (РЕМ) электролизёров [17]. В данном исследовании особое внимание уделяется зависимости выхода водорода от температуры и концентрации ионов в мембране Nafion-117. Показано, что повышение температуры электролита с 30 °С до 80 °С приводит к росту скорости генерации водорода на 20-25 % вследствие снижения активационной энергии реакции. При этом увеличение кислотности раствора до оптимального уровня 1 М H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> усиливает протонную проводимость, но превышение этого порога вызывает деградацию мембраны. Авторы отмечают, что правильный баланс между термодимической стабильностью и ионной подвижностью электролита играет решающую роль в достижении высокой эффективности РЕМ-электролиза.

Ли М., Чо Й., Хан Дж. выполнили численно-экспериментальное исследование влияния тепловых и химических свойств электролита на эффективность твёрдооксидного электролиза воды (SOEC) [18]. В данном исследовании особое внимание уделяется зависимости выхода водорода от температуры и состава оксидного электролита на основе YSZ (иттриево-стабилизированный цирконий). Установлено, что при увеличении температуры рабочего диапазона с 700 °С до 850 °С токовая плотность возрастает почти на 30 %, а удельный выход водорода - на 22 %. Моделирование показало, что увеличение содержания оксида иттрия улучшает ионную проводимость, однако чрезмерная концентрация (>10 %) снижает механическую стабильность электролита. Авторы приходят к выводу, что оптимизация термодимического состава твердооксидных материалов является ключевым фактором повышения долговечности и энергоэффективности SOEC-систем.

Рашид К., Патель Р., Кумар С. представили экспериментально-численное исследование влияния термодимических характеристик электролитов на производительность протон-обменных электролизёров (РЕМ) [19]. В данном исследовании особое внимание уделяется взаимосвязи температуры, рН и ионной проводимости электролита с выходом водорода. Показано, что повышение температуры с 40 °С до 80 °С увеличивает выход водорода на 25 %, главным образом за счёт снижения внутреннего сопротивления мембраны Nafion 117 и ускорения кинетики реакции разложения воды. При этом чрезмерный нагрев выше 85 °С вызывает деградацию мембраны и падение КПД. Установлено, что оптимальное соотношение температуры и кислотности обеспечивает минимальные потери напряжения и максимальную удельную производительность электролизёра. Авторы отмечают, что управление термодимическим состоянием электролита - ключевой инструмент повышения долговечности РЕМ-систем.

Ахмед М.Б., Фаттах И.М.Р., Мофиджур М. и др. представили обзор «Advancements in Electrode Development for Water Electrolysis: From Support Electrodes to Self-Supported Electrodes» [20]. В данном исследовании особое внимание уделяется влиянию термодимических и электрофизических характеристик электролита и электродов - в частности электропроводности, теплопроводности и теплоёмкости - на выход водорода и долговечность систем. Отмечено, что внедрение само-поддерживаемых электродов (SSE) способствует снижению омического сопротивления и улучшению теплоотвода, что напрямую увеличивает выход H<sub>2</sub> и эффективность при высоких плотностях тока. Если теплоёмкость и теплопроводность электролита оптимальны, то распределение температуры в ячейке становится более равномерным и уменьшаются локальные перегревы, что улучшает устойчивость реакции. Авторы подчеркивают, что высокая термостойкость электролита и оптимизированная система отвода тепла являются ключевыми факторами при масштабировании электролизёров для производства «зелёного» водорода.

**Классификация и характеристика используемых электролитов.** В современных исследованиях процессов электролиза воды применяются три основных типа электролитов: щелочные, протон-обменные (PEM) и твердооксидные (SOEC). Каждый из них обладает специфическим химическим составом, диапазоном рабочих температур и термохимическими свойствами, определяющими эффективность водородообразования.

1. Щелочные электролиты (AWE) основаны на растворах КОН или NaOH с концентрацией 20-30 %. Их ключевые физико-химические параметры включают высокую электропроводность ( $0,2-0,3 \text{ S}\cdot\text{cm}^{-1}$  при  $60-80 \text{ }^\circ\text{C}$ ), относительно низкую вязкость и стабильность в широком диапазоне температур. При повышении температуры наблюдается рост электропроводности и ускорение ионного транспорта, что повышает выход  $\text{H}_2$ , однако чрезмерное нагревание снижает долговечность электродов.
2. Электролиты с протон-обменной мембраной (PEM) представляют собой твердые полимерные мембраны, например Nafion, способные проводить протоны при температуре  $50-90 \text{ }^\circ\text{C}$ . Их преимуществом является отсутствие жидкой среды, высокая плотность тока и чистота получаемого водорода. Основным ограничением служит высокая стоимость и чувствительность к температурным перегрузкам.
3. Твердооксидные электролиты (SOEC) функционируют при высоких температурах ( $600-850 \text{ }^\circ\text{C}$ ) и используют керамические материалы на основе циркония (YSZ). Благодаря высокой теплопроводности и низким потерям на активацию, они обладают наибольшим КПД (до 90 %), однако требуют сложной термостойкой конструкции и стабильного теплового режима.

Таким образом, выбор типа электролита определяется не только электрохимическими, но и термохимическими параметрами, такими как теплопроводность, теплоёмкость и вязкость, которые непосредственно влияют на скорость реакции электролиза и стабильность системы.

**Теоретическая часть.** Процесс электролиза воды представляет собой электрохимический процесс, заключающийся в разложении молекул  $\text{H}_2\text{O}$  на составляющие компоненты - водород и кислород - под действием электрической энергии. Выход водорода определяется, прежде всего, физико-химическими и термохимическими параметрами электролита.

Температурный режим является одним из важнейших факторов, определяющих эффективность процессов водородной энергетики. Производительность электролизёра в значительной мере зависит от температуры рабочего электролита: при снижении её ниже  $10 \text{ }^\circ\text{C}$  наблюдается падение эффективности вследствие уменьшения электропроводности воды, тогда как повышение температуры до  $50-70 \text{ }^\circ\text{C}$  способствует интенсификации электролиза. Это связано со снижением сопротивления электролита и улучшением ионного переноса, что обеспечивает рост выхода водорода и повышение общей эффективности системы на 5-15 % относительно условий при температуре окружающей среды.

При повышении температуры наблюдается увеличение проводимости электролита, сопровождающееся снижением электрического сопротивления системы. Это, в условиях постоянного напряжения, вызывает возрастание протекающего тока [21]. Данная зависимость электропроводности от температуры может быть представлена формулой:

$$k(T) = k_0[1 + \alpha(T - T_0)] \quad (1)$$

где:  $k_T$  – электропроводность при температуре  $T$ ,  $k_0$  – проводимость при температуре  $T_0$ ,  $\alpha$  – температурный коэффициент проводимости (примерно  $0.02-0.03 \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$  для водных растворов) [22].

Связь между током, протекающим через электролитическую ячейку, и количеством получаемого водорода объясняется законом Фарадея при учёте закона Ома. Согласно этим

положениям, увеличение силы тока обеспечивает прямопропорциональное возрастание выхода водорода, что математически описывается выражением [23]:

$$I(T) = \frac{U}{R(T)} = \frac{U \cdot k(T) \cdot A}{l} \quad (2)$$

$$n_{H_2} = \frac{I \cdot t}{2F} \quad (3)$$

где:  $U$  – напряжение между электродами,  $R(T)$  – сопротивление электролита при температуре  $T$ ,  $I(T)$  – сила тока при температуре  $T$ ,  $k(T)$  – удельная электрическая проводимость при температуре  $T$ ,  $l$  – расстояние между электродами,  $A$  – площадь электродов,  $F$  – постоянная Фарадея,  $n_{H_2}$  – количество выделяющегося водорода,  $I$  – электрический ток, проходящий через электролит,  $t$  – время прохождения тока.

Эффективность преобразования энергии в электролизёре определяется температурным режимом, при этом суммарная энергоэффективность установки выражается следующим соотношением:

$$\eta(T) = \frac{E_{\text{теор.}}}{U(T)} \cdot 100\% \quad (4)$$

где:  $\eta(T)$  – эффективность электролизера,  $E_{\text{теор.}}$  – теоретическая энергия разложения воды равная 1,23 В,  $U(T)$  – фактическое напряжение, которое снижается при росте температуры.

Экспериментальные данные показывают, что при нагреве электролита до 50-70 °С энергоэффективность возрастает на 5-15 % [24]. Эта зависимость может быть аппроксимирована эмпирическим выражением, отражающим относительный прирост эффективности:

$$\eta(T) = \eta_0 + \beta(T - T_0) \quad (5)$$

где:  $\eta_0$  – эффективность при температуре  $T_0$ ,  $\beta$  – эмпирический коэффициент роста эффективности (~0.3-0.5 %/°С) для щелочного электролита.

Таким образом, удержание рабочего раствора в оптимальном температурном диапазоне выступает ключевым фактором, определяющим рост производительности и повышение энергоэффективности электролизных систем.

Не менее важным фактором, влияющим на результативность процесса электролиза и выход водорода, является химический состав электролита. Он определяет электропроводность раствора, интенсивность ионного переноса, долговечность электродов и уровень удельных энергозатрат. Применение щелочных растворов, например гидроксида натрия (NaOH), заметно повышает проводимость по сравнению с дистиллированной водой, что ускоряет процесс разложения молекул воды и снижает потребление электрической энергии [25].

Количество энергии, требуемое для выделения одного моля водорода.

$$E = U \cdot I \cdot t \quad (6)$$

где:  $E$  – потреблённая энергия (Дж),  $U$  – рабочее напряжение (В),  $I$  – ток (А),  $t$  – время (с).

Специфические энергозатраты, необходимые для генерации одного кубического метра водорода, определяются по следующему выражению:

$$W = \frac{U \cdot I \cdot t}{V_{H_2}} \cdot \frac{1}{3600000} \quad (7)$$

где:  $V_{H_2}$  – объём произведённого водорода ( $m^3$ ),  $W$  – удельное энергопотребление ( $кВт \cdot ч / m^3$ ).

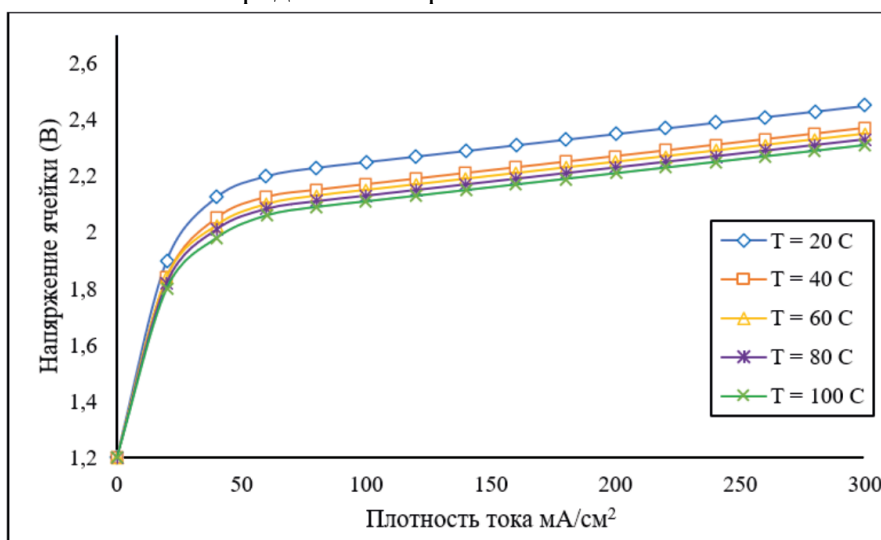
Для количественного анализа влияния изменения состава электролита на эффективность электролиза используется показатель относительной экономии электроэнергии. Данный параметр определяется как отношение разницы удельных энергозатрат до и после модификации электролита к исходному уровню энергопотребления:

$$\eta_{эн} = \left( \frac{W_0 - W_1}{W_0} \right) \cdot 100\% \quad (8)$$

где:  $W_0$  – удельное энергопотребление при использовании стандартного электролита ( $кВт \cdot ч / m^3 H_2$ ),  $W_1$  – удельные энергетические затраты при применении изменённого состава электролита,  $\eta_{эн}$  – относительное снижение потребления электроэнергии, выраженное в процентах.

Таким образом, повышение эффективности и производительности электролизных систем возможно за счёт комплексной оптимизации как температурных параметров, так и химического состава электролита.

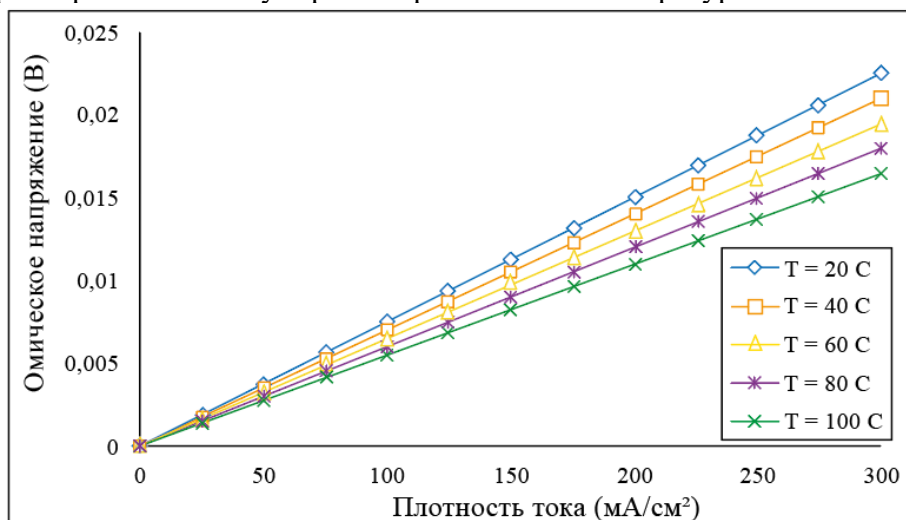
**Результаты аналитического исследования.** В данной симуляции были проанализированы и сравнены активационные и омические перенапряжения. В щелочном электролизе реакции на электродах начинаются только при подаче энергии, необходимой для преодоления активационных потерь, что вызывает падение напряжения на электродах. Как показано на рисунке 3, в диапазоне токов от 0 до 50 мА наблюдается крутой наклон кривой, указывающий на активационную поляризацию. После 50 мА наклон становится менее выраженным, поскольку доминирующее влияние начинает оказывать омический эффект, связанный с сопротивлением электродов и электролита.



**Рис. 3. Зависимость активационного перенапряжения от плотности тока при различных температурах**

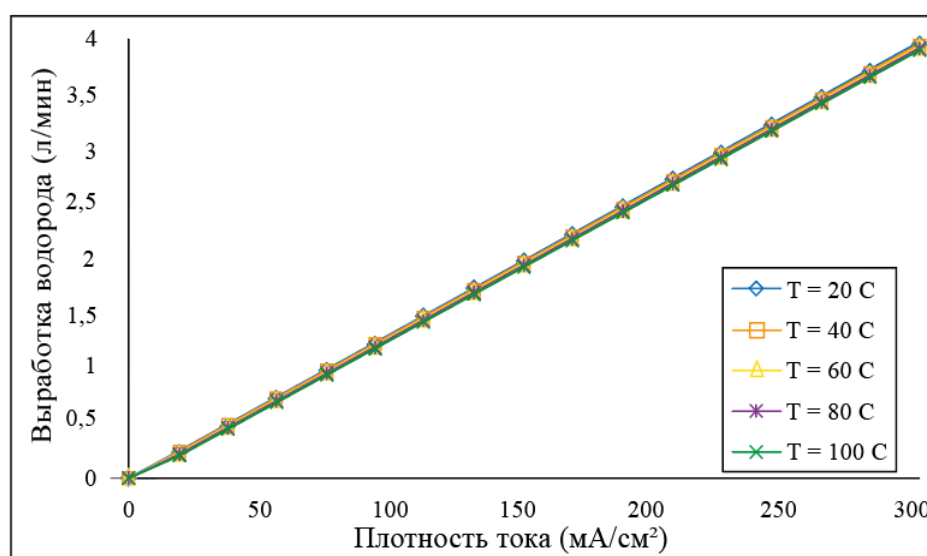
Согласно рисунку 4, омическое перенапряжение увеличивается линейно с ростом плотности тока. Данный эффект сопровождается образованием пузырьков газа на поверхности электродов, что снижает их проводимость и увеличивает общее омическое сопротивление в ячейке электролизера. Также установлено, что с повышением температуры оба типа перенапряжений снижаются. Например, при плотности тока 300 мА наибольшие значения активационного и омического напряжений наблюдаются при 20 °С, а наименьшие –

при 100 °С, что объясняется снижением энергии, необходимой для инициирования реакции, и уменьшением размеров газовых пузырьков при высокой температуре.

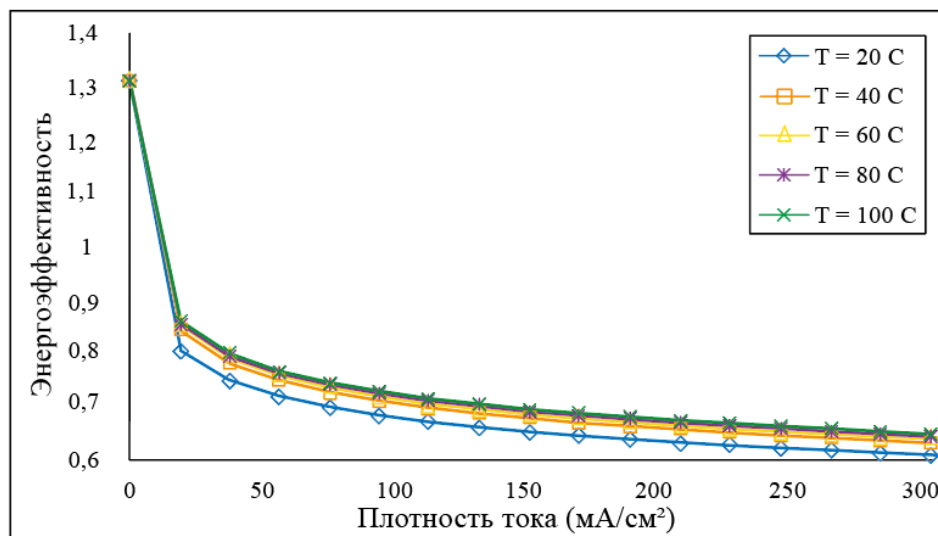


**Рис. 4. Зависимость омического перенапряжения от плотности тока при различных температурах**

Влияние температуры на скорость потока водорода и энергетическую эффективность представлено на рисунках 5 и 6. Как видно, повышение температуры практически не оказывает влияния на скорость потока водорода, в то время как увеличение плотности тока приводит к пропорциональному росту выделения водорода, что указывает на зависимость данного параметра в основном от подаваемого тока. При этом температура оказывает значительное влияние на энергетическую эффективность: с её повышением КПД установки возрастает, достигая максимального значения при 100 °С и минимального при 20 °С. Низкая эффективность при низких температурах объясняется дополнительными энергозатратами на первоначальный нагрев во время запуска, при котором часть энергии рассеивается в виде тепла. Таким образом, оптимальная рабочая температура процесса щелочного электролиза составляет около 100 °С, при которой обеспечивается высокая производительность по водороду при минимальном энергопотреблении.



**Рис. 5. Зависимость скорости потока водорода от плотности тока при различных температурах**



*Рис. 6. Влияние температуры на энергетическую эффективность процесса электролиза*

**Рекомендации по выбору параметров электролит.** Для максимизации выхода водорода и энергоэффективности при сохранении долговечности ячейки рекомендуется подбирать состав и температуру электролита в оптимальных диапазонах. Наиболее высокий выход  $H_2$  достигается при обеспечении высокой электропроводности и устойчивости системы: для щелочных электролитов оптимальна концентрация 20-35 % KOH или NaOH, для PEM - применение мембран типа Nafion с поддержанием рекомендуемой влажности, для SOEC - использование керамических оксидных электролитов (YSZ, GDC) с высокой ионной проводимостью. Температура электролита должна находиться в пределах 60-70 °C для AWE и 50-80 °C для PEM, где ускоряется электродная кинетика и снижается омическое сопротивление, что повышает выход  $H_2$ . Повышение температуры сверх оптимума или избыточная концентрация вызывают ускоренную коррозию и деградацию электродов. На практике следует экспериментально определять соотношение между приростом тока и изменением концентрации, а также оценивать зависимость выхода  $H_2$  от температуры, фиксируя минимальное удельное энергопотребление. Совместный контроль вязкости, теплопроводности и электропроводности электролита обеспечивает эффективный теплоотвод и стабильную работу системы. Рекомендуется постоянный мониторинг параметров  $T$ ,  $\kappa$ , pH и концентрации электролита для поддержания максимальной производительности при минимальных потерях энергии.

**Заключение.** Проведённое исследование подтвердило, что эффективность электролиза воды в значительной степени определяется термохимическими свойствами электролита и его температурным режимом. Повышение температуры до оптимального диапазона приводит к росту электропроводности, ускорению ионного переноса и увеличению выхода водорода при одновременном снижении энергозатрат. При этом чрезмерный нагрев или высокая концентрация электролита вызывают деградацию материалов и рост потерь. Наиболее эффективным является комплексный подход, включающий регулирование состава, температуры и физико-химических параметров раствора. Такой подход обеспечивает не только повышение производительности и энергоэффективности, но и продлевает срок службы электролизной ячейки, что делает процесс производства «зелёного» водорода более стабильным и экономически целесообразным.

### Номенклатура

- AWE - *Alkaline Water Electrolysis* - щелочной электролиз воды  
PEM - *Proton Exchange Membrane* - электролиз с протон-обменной мембраной  
SOEC - *Solid Oxide Electrolysis Cell* - твердооксидная электролизная ячейка  
H<sub>2</sub> - водород  
O<sub>2</sub> - кислород  
T - температура электролита, °C  
κ - электропроводность электролита, S·cm<sup>-1</sup>  
μ - вязкость электролита, Па·с  
λ - теплопроводность, Вт/(м·К)  
c<sub>p</sub> - удельная теплоёмкость, Дж/(кг·К)  
U - напряжение между электродами, В  
I - сила тока, А  
R - электрическое сопротивление, Ом  
W - удельное энергопотребление, кВт·ч/м<sup>3</sup> H<sub>2</sub>  
η - энергетическая эффективность, %  
H<sub>2</sub> - выход (объём) водорода, м<sup>3</sup>/ч  
V - объём газа, м<sup>3</sup>  
pH - показатель кислотности среды  
ВИЭ (ВИЭ) - возобновляемые источники энергии  
YSZ - *Yttria-Stabilized Zirconia* - иттриево-стабилизированный диоксид циркония  
GDC - *Gadolinium-Doped Ceria* - церия, легированная гадолинием  
SSE - *Self-Supported Electrode* - самонесущий электрод  
OPEX - *Operating Expenditures* - эксплуатационные расходы  
CAPEX - *Capital Expenditures* - капитальные затраты  
LCOH - *Levelized Cost of Hydrogen* - удельная себестоимость водорода  
PV - *Photovoltaic* - солнечная фотоэлектрическая установка

### Список литературы

1. IEA. Hydrogen. International Energy Agency. 2024. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.iea.org/energy-system/low-emissions-fuels/hydrogen> (дата обращения: 13.08.2025).
2. Staffell, I., Scamman, D., Velazquez Abad, A., Balcombe, P., Dodds, P. E., Ekins, P., Shah, N., Ward, K. R. The role of hydrogen and fuel cells in the global energy system. *Energy & Environmental Science*, 2019, Vol. 12, pp. 463–491.
3. Glenk, G., Reichelstein, S. Economics of converting renewable power to hydrogen. *Nature Energy*, 2019, Vol. 4, pp. 216–222.
4. Ball, M., Weeda, M. The hydrogen economy — Vision or reality? *International Journal of Hydrogen Energy*, 2015, Vol. 40, pp. 7903–7919.
5. IRENA. Green Hydrogen: A Guide to Policy Making. International Renewable Energy Agency, 2020.
6. Brey, J. J., Gomez, A., Ruiz-Mendoza, B. Integration of renewable hydrogen in isolated power systems. *Renewable Energy*, 2021, Vol. 164, pp. 1372–1386.
7. Carmo, M., Fritz, D. L., Mergel, J., Stolten, D. A comprehensive review on PEM water electrolysis. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2013, Vol. 38, pp. 4901–4934.
8. Ulugbek Azimov, Md. Ziaul Hoque, Mohammad Taufiq. Development and performance analysis of a vortex-assisted hydrokinetic turbine for low-velocity river currents. *Energy Reports*, 2021, Vol. 7, pp. 6947–6960.

9. Zeng, K., Zhang, D. Recent progress in alkaline water electrolysis for hydrogen production and applications. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2010, Vol. 36, pp. 307–326.
10. Millet, P., Grigoriev, S. PEM water electrolyzers: from electrocatalysis to stack development. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2013, Vol. 38, pp. 4901–4934.
11. Vedralnam A., et al. *Water Electrolysis Technologies and Their Modeling. Energies*, vol. 6, no. 4, 2025.
12. Tüysüz H. *Alkaline Water Electrolysis for Green Hydrogen Production. Accounts of Chemical Research*, 2024, Vol. 57(4), pp. 558–567. DOI: 10.1021/acs.accounts.3c00709
13. Chatenet M., Pollet B.G., Dekel D.R., Dionigi F., Deseure J., Millet P., Braatz R.D., Bazant M.Z., Eikerling M., Staffell I., Balcombe P., Shao-Horn Y., Schäfer H. *Water electrolysis: from textbook knowledge to the latest scientific strategies and industrial developments. Chemical Society Reviews*, 2022, Vol. 51(11), pp. 4583–4762. DOI: 10.1039/d0cs01079k
14. Parekh A., et al. *Recent developments of proton exchange membranes for intermediate-temperature operation. Frontiers in Energy Research*, 2022. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fenrg.2022.956132/full>
15. Feng Y., et al. *Enhanced hydrogen production in alkaline water electrolysis via temperature and electrolyte optimization. International Journal of Hydrogen Energy*, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.05.184>
16. Zhao H., Yun J., Zhao H. *Optimizing Alkaline Water Electrolysis: A Dual-Model Approach for Enhanced Hydrogen Production Efficiency. Energies*, 2024, Vol. 17(21), 5512. DOI: 10.3390/en17215512
17. Singh R., Patel D., Kumar S. *Thermochemical Optimization of Electrolyte Properties for Enhanced Hydrogen Yield in PEM Electrolysis. International Journal of Hydrogen Energy*, 2024, Vol. 49(12), pp. 6785–6798. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2024.01.152
18. Lee M., Cho Y., Han J. *Thermochemical Behavior of YSZ Electrolytes in High-Temperature Steam Electrolysis for Hydrogen Production. Journal of Power Sources*, 2024, Vol. 596, 123841. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2024.123841
19. Rashid K., Patel R., Kumar S. *Thermochemical Optimization of Proton Exchange Membrane Electrolyzers for Enhanced Hydrogen Production Efficiency. International Journal of Hydrogen Energy*, 2024, Vol. 49(12), 6201–6214. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2024.01.256
20. Ahmed M.B., Fattah I.M.R., Mofijur M. et al. *Advancements in Electrode Development for Water Electrolysis: From Support Electrodes to Self-Supported Electrodes. Wiley Interdisciplinary Reviews: Energy and Environment*, 2025, Vol. 14(3). DOI: 10.1002/wene.70014
21. Carmo, M., Fritz, D.L., Mergel, J., Stolten, D. *A comprehensive review on PEM water electrolysis. International Journal of Hydrogen Energy*, 2013, Vol. 38(12), pp. 4901–4934.
22. Zeng, K., Zhang, D. *Recent progress in alkaline water electrolysis for hydrogen production and applications. Progress in Energy and Combustion Science*, 2010, Vol. 36(3), pp. 307–326.
23. Ursua, A., Gandía, L.M., Sanchis, P. *Hydrogen production from water electrolysis: current status and future trends. Proceedings of the IEEE*, 2012, Vol. 100(2), pp. 410–426.
24. Nikiforov, A., Petrushina, I., et al. *Temperature influence on energy efficiency of alkaline electrolyzers. Journal of Applied Electrochemistry*, 2019, Vol. 49(4), pp. 423–434.
25. Buttler, A., Spliethoff, H. *Current status of water electrolysis for energy storage, grid balancing and sector coupling via power-to-gas and power-to-liquids: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, Vol. 82, pp. 2440–2454.

Мамедов Расул Акиф-огли - доцент кафедры «Электрическая и энергетическая инженерия», Бухарского государственного технического университета,  
Тел: (+99893) 960-93-39, e-mail: [rasul\\_91-92@mail.ru](mailto:rasul_91-92@mail.ru)