

**ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫНЫҢ ҰЛТТЫҚ ИНЖЕНЕРЛІК АКАДЕМИЯСЫ  
АКАДЕМИК Ө.А. ЖОЛДАСБЕКОВ АТЫНДАҒЫ МЕХАНИКА ЖӘНЕ МАШИНАТАНУ  
ИНСТИТУТЫ**

**НАЦИОНАЛЬНАЯ ИНЖЕНЕРНАЯ АКАДЕМИЯ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН  
ИНСТИТУТ МЕХАНИКИ И МАШИНОВЕДЕНИЯ ИМЕНИ АКАДЕМИКА  
У.А.ДЖОЛДАСБЕКОВА**

**NATIONAL ENGINEERING ACADEMY OF THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN  
U. JOLDASBEKOV INSTITUTE OF MECHANICS AND ENGINEERING**



**«БОЛАШАҚ МЕХАНИКАСЫ» атты**

Екінші Халықаралық Жолдасбеков Симпозиумының

**БАЯНДАМАЛАР ЖИНАҒЫ**

1-5 наурыз 2021 жыл, Алматы

**СБОРНИК ДОКЛАДОВ**

Второго Международного Джолдасбековского Симпозиума

**«МЕХАНИКА БУДУЩЕГО»**

1-5 марта 2021 года, Алматы

**REPORTS DIGEST**

Second International Joldasbekov Symposium

**«FUTURE MECHANICS »**

1-5 March 2021, Almaty

## ТАМШЫНЫҢ КӨЛБЕУ БЕТ БОЙЫМЕН ҚОЗҒАЛУ МӘСЕЛЕСІН ЗЕРТТЕУ

Качкинова А.К, Берденова Б.А, Туралина Д.Е

Әл-Фараби атындағы Қазақ Ұлттық Университеті, Әл-Фараби 71, 050040 Алматы, Қазақстан,  
[azk.kch@gmail.com](mailto:azk.kch@gmail.com)

**Абстракт.** Тамшы эффектісі бүгінде ғылымның әр түрлі салаларында маңызды рөл атқарады. Ол көптеген өндірістік процестерде маңызды рөл атқарады. Дәлірек айтқанда, энергетика (жоғары қарқынды жылу алмасу жүйелерінің құрылысы), химия өнеркәсібі (сұйықтықтарды тасымалдау, бөлу), авиация (өзін-өзі тазартатын, буланбайтын, су өткізбейтін беттерді құру), машина жасау (жылу қозғалтқыштарын дамыту), медицина (микробқа қарсы беттерді құру). Жұмыста қатты және сұйық фаза арасындағы жанасу бұрышы қарастырылды. Бірінші жағдайда, горизонталь бағытта түзу жатқан үш түрлі қатты бетке (сталь, пластмасса, ағаш) тамшы тұрғызылды. Қатты бет пен сұйық фаза арасындағы жанасу бұрышы қарастырылды. Екінші жағдайда, қатты бет көлбеу орналастырылды. Қатты бет көлбеу орналасқан жағдайда, тамшыға үйкеліс күші, ауырлық күші әсер етеді, нәтижесінде тамшы қозғалысқа келеді. Алға жылжу және шегіну жанасу бұрыштары қарастырылды. Қатты бетке тұрғызылған тамшы COMSOL Multifysics бағдарламалық пакетінде модельденді.

**Түйінді сөздер:** Ылғалдандыру, жанасу бұрышы, статикалық жанасу бұрышы, динамикалық жанасу бұрышы, көлбеу (сырғу) бұрышы, беттік керілу, COMSOL Multiphysics.

**Кіріспе.** Ылғалдандыру - бұл фазалар арасында пайда болатын беттік құбылыс, оның біреуі қатты, ал екіншілері сұйықтық және газ. Ылғалдылық сұйықтықтың қатты бетке ішінара немесе толық таралуынан, кеуекті денелер мен ұнтақтардың сіндірілуінен көрінеді. Ылғалдану сұйық пен қатты дененің беттері арасындағы бұрыш-  $\theta$  жанасу бұрышы мәнімен сипатталады. Беттік керілу – фазалар арасындағы беттегі бірлік ауданға келетін энергия (бірлік қашықтыққа келетін күш). Қатты дененің сұйықтықпен сулануын беттік керілу күштерінің әрекеті нәтижесінде түсіндіруге болады. Ылғалдануға қатысатын фазалардың байланысын сипаттайтын термодинамикалық шама  $\sigma$  беттік керілу болып табылады. Жанасу бұрышы  $\theta$  - сұйық тамшы мен қатты немесе басқа фазаның беті арасында пайда болатын бұрыш. Жанасу бұрышы сұйықтың бетте қаншалықты жақсы немесе қаншалықты нашар жайлатынын көрсетеді. Негізінен жанасу бұрышы сұйықтықтың қатты бетпен өзара әрекеттесуін білдіреді.[2]

Статикалық жанасу бұрышы сұйық тамшы қатты бетке қозғалмай тұрған кезде өлшенеді. Динамикалық байланыс бұрышы фазалар арасындағы бет қозғалғанда және статикалық байланыс бұрышы уақытқа байланысты өзгергенде өлшенеді. Динамикалық

байланыс бұрышы екі түрге бөлінеді - алға жылжу  $\theta_a$  және шегіну  $\theta_r$  (Сурет 2). Өлшеуді екі тәсілмен жасауға болады - тамшы көлемін өзгерту әдісі және тіреуді еңкейту әдісі.

Алға жылжу жанасу бұрышы  $\theta_a$ : ең үлкен жанасу бұрышы, қосымша сұйықтық қосып фазалар арасындағы бет аймағын ұлғайту арқылы жүзеге асырылады [2][4].

Шегіну жанасу бұрышы  $\theta_r$ : сұйықтық тамшысының көлемі азайған кезде пайда болады.

Бірдей қоршаған орта параметрлерінде (қысым, температура) қатты бет ылғалданған кезде, олардың түзілу шарттарына байланысты статикалық байланыс бұрыштары әртүрлі мәндерге ие бола алады. Бұл құбылыс ылғалдану гистерезисі деп аталады.

### Математикалық модель.

Қозғалыс мөлшерінің сақталу заңы үшін Навье-Стокс теңдеуі

$$\rho(u \cdot \nabla)u = \nabla \cdot (-pI + K) + F$$

Массаның сақталу заңы үшін Үзіліссіздік теңдеуі

$$\rho \nabla \cdot u = 0$$

Мұнда,  $\rho$  – тығыздық;  $u$  – жылдамдық;  $p$  – қысым;  $I$  – бірлік матрица;  $F$  – көлемдік күштер;  $K = \mu(\nabla u + (\nabla u)^T)$  – беттік күштер;  $\mu$  – динамикалық тұтқырлық.

$$P_{init} = P + P_{hydro}$$

$$P_{hydro} = \rho_{ref} g \cdot (r - r_{ref})$$

Мұнда,  $P_{init}$  – бастапқы қысым;  $P_{init}$  – Навье-Стокс, RANS теңдеулерінен тәуелді қысым айнымалысы;  $P_{hydro}$  – гидростатикалық қысым;  $\rho_{ref}$  – енгізілетін тығыздық мәні;  $g$  – еркін түсу үдеуі;  $r$  – бастапқы деңгей;  $r_{ref}$  – енгізілетін теңдеу.

Шекаралық шарттар келесі түрде жазылады:

$$[-pI + K]n = -(f_0 + p_{hydro})n$$

$$p_{hydro} = \rho_{ref} g \cdot (r - r_{ref})$$

$$[-pI + K]n = -(\hat{p}_0 + p_{hydro})n, \hat{p}_0 \leq p_0$$

$$n^T[-pI + K]n = -(\hat{p}_0 + p_{hydro}), \hat{p}_0 \geq p_0, \quad u \cdot t = 0$$

Мұнда,  $f_0$  – гидростатикалық қысымға тең нормаль қысым;  $p_0$  – шекарадағы қысым мәні;

Интерфейс сұйықтық ағынымен  $u$  жылдамдықпен тасымалдануын сипаттау үшін келесі тасымал теңдеуі қолданылады (фазалар арасындағы ауысу қабатының қалыңдығын береді):

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} + u \nabla \varphi = \gamma \nabla (\epsilon_{ls} \nabla \varphi - \varphi(1 - \varphi) \frac{\nabla \varphi}{|\nabla \varphi|}), \quad \varphi = phils$$

Мұнда,  $\varphi$  – деңгей функциясы;  $\gamma$  – қайталау инициализация параметрі, м/сек;  $\epsilon_{ls}$  – интерфейс қалыңдығын бақылайтын параметр, м;

Беттік керілу күші:

$$F_{st} = \sigma \delta k n_{int} + \delta \nabla_s \sigma$$

Мұнда,  $\sigma$  – беттік керілу коэффициенті;  $k = -\nabla \cdot n_{int}$  – кинетикалық энергия;

$$\nabla_s = (I - n_{int} n_{int}^T) \nabla$$

Интерфейсті тікелей анықтаудан басқа, жылдамдық пен тұтқырлықты  $\varphi$  функциясының мәніне тәуелді етіп анықтау керек.  $\varphi$  концентрациясының аналогы ретінде қарастыра отырып, оларды келесідей анықтаймыз:

$$\rho = \rho_1 + (\rho_2 - \rho_1) \varphi$$

$$\mu = \mu_1 + (\mu_2 - \mu_1) \varphi$$

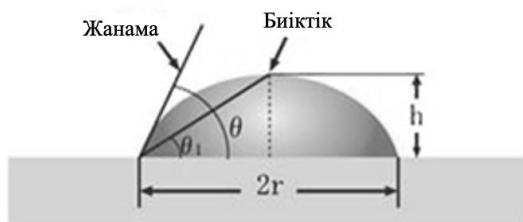
Блғалданатын шекара шарттары:

$$u \cdot n = 0, F_{wall} = \sigma \delta (n \cdot n_{int} - \cos(\theta_w)) n_{int} - \frac{\mu}{\beta} [u - (u \cdot n) n]$$

$$n(\epsilon_{ls} \nabla \varphi - \varphi(1 - \varphi) \frac{\nabla \varphi}{|\nabla \varphi|}) = 0$$

Мұнда,  $\theta_w$  – жанасу бұрышы;  $\beta$  – сырғу ұзындығы;

Егер тамшының мөлшері кішкентай болса, онда оны шардың бөлігі ретінде және тамшы профилін екі өлшемді түрде көрсетуге болады, яғни, шеңбер түрінде (Сурет 1):



Сурет 1. Тамшы геометриясы

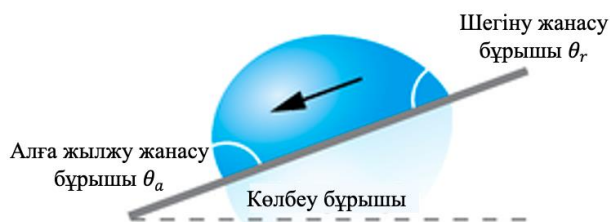
$$\theta_1 = \arccos(r/h)$$

$$\theta = 2\theta_1$$

$h$  - биіктік;  $r$  – жартылай ені.

Гистерезис бұрышы  $\theta_H$  : бұл алға жылжу мен шегіну бұрыштарының арасындағы айырмашылық (Сурет 2)

$$\theta_H = \theta_a - \theta_r$$



Сурет 2. Көлбеу орналасқан қатты бетке тұрғызылған су тамшысы мен алға жылжу және шегіну жанама бұрыштары

Жанама бұрыштарының жататын аралық:

$$0^\circ < \theta_r < \theta < \theta_a < 180^\circ$$

$$\cos\theta_r < \cos\theta < \cos\theta_a$$

Динамикалық жанама бұрыштары:

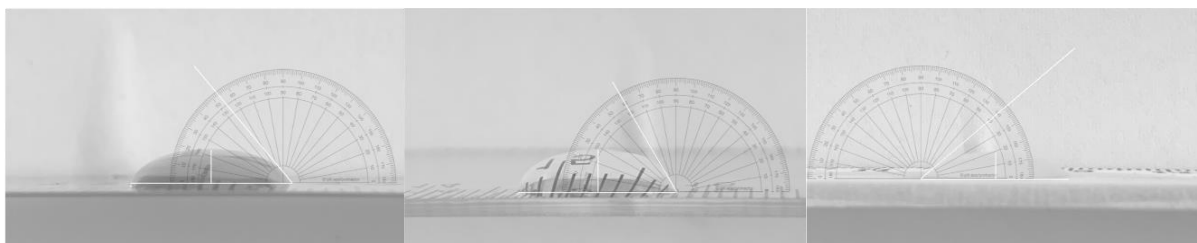
$$\theta_r \leq \theta \leq \theta_a$$

$$\cos\theta_r \leq \cos\theta \leq \cos\theta_a$$

### Эксперименттік зерттеу әдісі.

Қатты беттерге тамшы тұрғызылып, екі фаза арасындағы жанасу бұрышы есептелуі керек. Қатты беттің орналасуы екі жағдайда қарастырылады: біріншісі, қатты бет горизонталь бойында тегіс жатқанда (Сурет 3), екіншісі, қатты бет көлбеу орналасқан (Сурет 4). Тәжірибеде 3 түрлі қатты бет - темір, пластмасса және ағаш алынды. Қатты беттердің көлбеу бұрышы  $\alpha = 30^\circ$  тең. Қатты беттерге тұрғызылатын тамшы көлемі  $V = 0,2\text{мл}$ . Тәжірибе барысында алынған шамалар кестеге толтырылды (Кесте 1, Кесте 2).

#### Тәжірибе-1.



Сурет 3.Тәжірибе жасау барысында түсірілген суреттер

	Темір	Пластмасса	Ағаш
Жанасу бұрышы (эксперменттік өлшенген) $\theta$	$50^\circ$	$60^\circ$	$40^\circ$
Биіктік $h$ , см	0,68 см	0,81 см	0,51 см
Диаметрі $D$ , см	3,04 см	2,96 см	2,79 см
$\theta_1 = \text{arcctg}(r/h)$	$24,1144985^\circ$	$28,706328^\circ$	$20,09216^\circ$
Жанасу бұрышы (есептелінген) $\theta = 2\theta_1$	$\theta = 48,2289971^\circ$	$\theta = 57,41265^\circ$	$\theta = 40,1843259^\circ$
Қателік, $\varepsilon$	$1,77^\circ$	$2,58735^\circ$	$0,184329^\circ$

Кесте 1. Тәжірибе барысында алынған және математикалық жолмен есептелінген шамалар

#### Тәжірибе-2.



Сурет 4.Тәжірибе жасау барысында түсірілген суреттер

	Темір	Пластмасса	Ағаш
Алға жылжу жанау бұрышы, $\theta_a$	22°	26°	16°
Шегіну жанау бұрышы, $\theta_r$	98°	116°	73°
Жүріп өткен жолы $S$ , см	5,9 см	5,69 см	4 см
Уақыты $t$ , сек	1,5 сек	1,9 сек	63 сек
Су тамшысының көлбеу бетте сырғу жылдамдығы, м/с	0,0393 м/с	0,0299 м/с	0,00063492 м /с

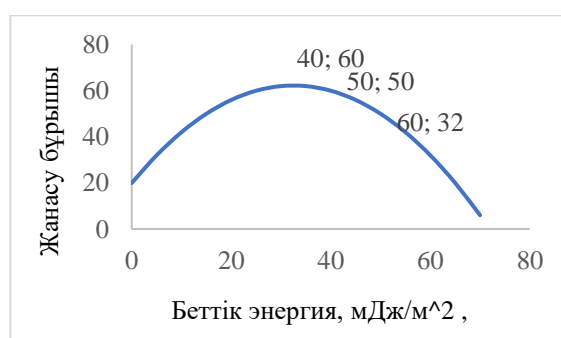
**Кесте 2.** Тәжірибе барысында алынған және математикалық жолмен есептелінген шамалар

### Есептеу нәтижелері.

Тәжірибе барысында алынған қатты беттің беттік энергия мәндері, қатты бет пен тамшы арасындағы жанау бұрышының мәндері кестеге толтырылды (Кесте 3, Кесте 4), тамшы эффектісін сипаттайтын шамалар арасындағы өзара тәуелділік графиктері тұрғызылды (График 1, График 2).

Қатты бет	Беттік энергия	Жанау бұрышы
Темір (сталь)	40-55 мДж/м <sup>2</sup>	50°
Пластмасса	30-35 мДж/м <sup>2</sup>	60°
Ағаш	55-65 мДж/м <sup>2</sup>	40°

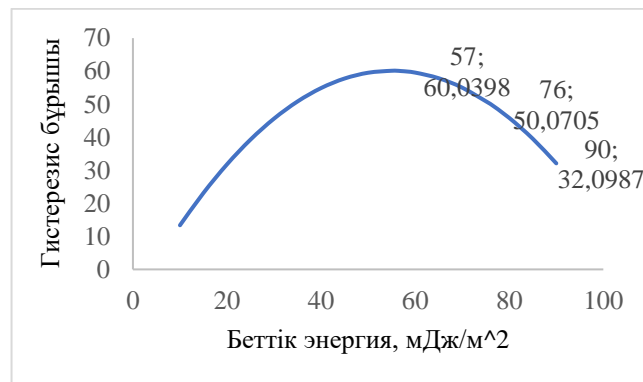
**Кесте 3.** Беттік фазаның сипаттамалары



**График 1.** Жанау бұрышы мен беттік энергия арасындағы тәуелділік

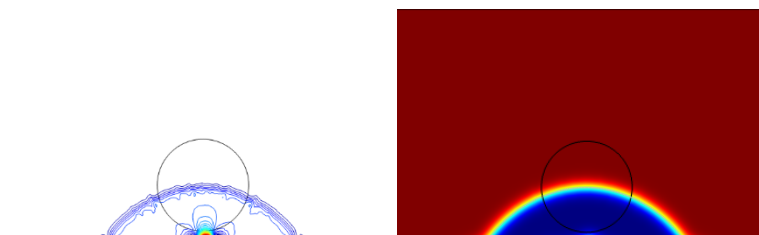
Қатты бет	Беттік энергия	Алға жылжу жанасу бұрышы	Шегіну жанасу бұрышы	Жылдамдық
Темір (сталь)	40-55 мДж/м <sup>2</sup>	22°	98°	0,0393 м/с
Пластмасса	30-35 мДж/м <sup>2</sup>	26°	116°	0,0299 м/с
Ағаш	55-65 мДж/м <sup>2</sup>	16°	73°	0,00063492 м/с

**Кесте 4.** Көлбеу орналасқан қатты бетке тұрғызылған тамшының динамикалық жанасу бұрыштары және қатты бетте тамшының сырғу жылдамдығы



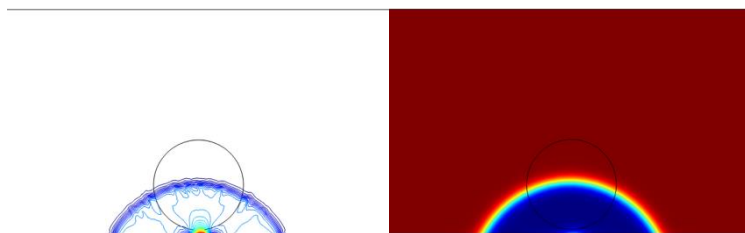
**График 2.** Гистерезис бұрышы мен беттік энергия арасындағы тәуелділік

Сандық зерттеу жұмыс реті-1 нәтижелері (Сурет 5а, b, с):

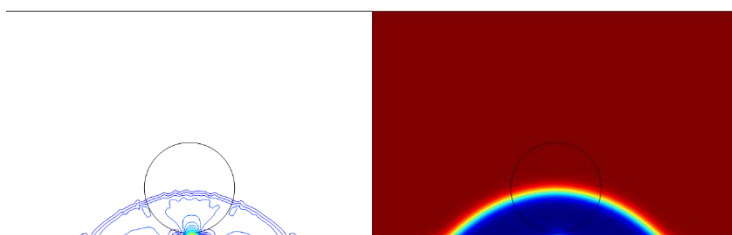


**Сурет 5а.**  $\theta_w = 50^\circ$  :  $t=0.03$  секундтағы қысым таралуы және секундтағы сұйықтың көлемдік үлесі



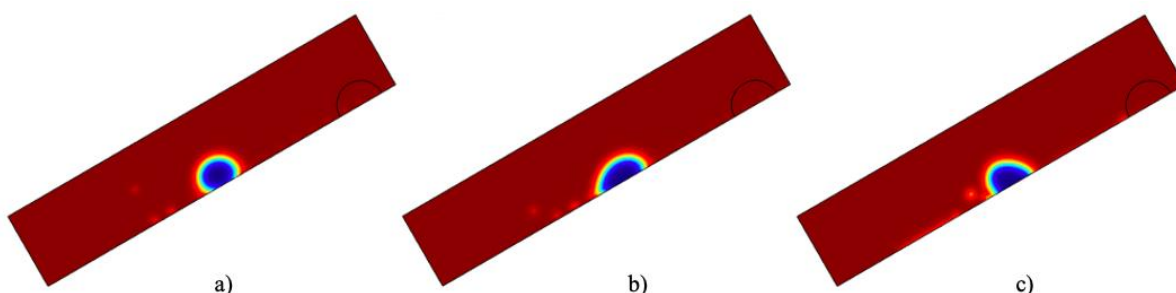


Сурет 5b.  $\theta_w = 60^\circ$ :  $t=0.03$  секундтағы қысым таралуы және секундтағы сұйықтың көлемдік үлесі



Сурет 5c.  $\theta_w = 40^\circ$ :  $t=0.03$  секундтағы қысым таралуы және секундтағы сұйықтың көлемдік үлесі

Сандық зерттеу жұмыс реті-2 нәтижелері (Сурет 6):



Сурет 6. Сұйықтың көлемдік үлесі, а)  $\theta_w = 150^\circ$ ; б)  $\theta_w = 120^\circ$ ; в)  $\theta_w = 90^\circ$

### Қорытынды.

Жобалық жұмыста қатты және сұйық фаза арасындағы жанасу бұрышы қарастырылды. Бірінші жағдайда, горизонталь бағытта түзу жатқан үш түрлі қатты бетке (сталь, пластмасса, ағаш) тамшы тұрғызылды. Қатты беттің ылғалдануына байланысты, қатты бет пен сұйық фаза арасындағы жанасу бұрышы мен тамшы формасының өзгеретіні байқалды. Қатты бет пен сұйық арасындағы жанасу бұрышы, фазалардың беттік керілуіне немесе беттік энергиясына байланысты. Бұл шамалардың арасындағы тәуелділік график түрінде көрсетілді.

Екінші жағдайда, қатты бет көлбеу орналастырылды. Сандық модельдеу барысында, қатты бетті гидрофобты деп алынды. Қатты бет көлбеу орналасқан жағдайда, тамшы қозғалысқа келеді. Тамшыға үйкеліс күші, ауырлық күші әсер етеді. Көлбеу бұрышы үлкейіп,

ал тамшы көлемі кішірейген кезде, тамшының қатты бет бойымен сырғу жылдамдығы ұлғаяды. Тамшы көлемінің үлкеюі, жанасу сызығының бойымен адгезия күшінің ұлғаюына алып келеді. Жанасу бұрышы  $\theta_w \geq 90^\circ$  болған жағдайда, тамшы көлбеу бетпен сырғыған кезде өз формасын кішігірім сақтайды. Ал  $\theta_w \leq 90^\circ$  болған жағдайда, яғни, гидрофильді қатты бет бойымен сырғыған кезде, су тамшысы қатты бет бойына жайылып кетеді. Жанасу бұрышы, қатты беттің гидрофильді немесе гидрофобты болуына, су тамшысының көлеміне, фазалардың беттік керілу шамаларына тәуелді.

#### **Қолданылған әдебиеттер тізімі.**

- [1]. David Quere, Marie-Jose Azzopardi, Laurent Delattre. Drops at Rest on a Tilted Plane// Langmuir 1998, 14, 2213-2216
- [2]. Yuehua Yuan and T. Randall Lee. Contact Angle and Wetting Properties// Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2013
- [3]. Derrick O. NJOBUENWU, Esio O. OBOHO, Rhoda H. GUMUS. Determination of Contact Angle from Contact Area of Liquid Droplet Spreading on Solid Substrate// Leonardo Electronic Journal of Practices and Technologies // ISSN 1583-1078// Issue 10, January-June 2007, p. 29-38
- [4]. YANG ChangWei, HE Feng\* & HAO PengFei. The apparent contact angle of water droplet on the micro-structured hydrophobic surface// Sci China Chem April (2010) Vol.53 No.4: 912–916.

<b>Секция 3. Математическое и компьютерное моделирование в области прикладной механики. Механика жидкости и газа. Вычислительная механика .....</b>	<b>138</b>
<b>Исахов А.А., Бекжигитова Ж.Е. Қоныстану аумақтарындағы ластаушы қоспалардың тасымалын химиялық реакцияларды есепке ала отырып сандық модельдеу .....</b>	<b>139</b>
<b>Догалаков Д.А., Бйгунчеков Ж.Ж., Жумашева Ж.Т., Баялиев О.К. Разработка отечественного малого электротранспорта (электротрицикла) и генератор-двигателя с использованием программного комплекса Solidworks 2018. ....</b>	<b>146</b>
<b>Джайчибеков Н.Ж., Шалабаева Б.С., Киреев В.Н. Моделирование динамики двух капель заряженных частиц жидкости под действием электрического поля .....</b>	<b>153</b>
<b>Кенжебаева М.О. Литературный обзор решения обратных задач гравиметрии .....</b>	<b>159</b>
<b>Исахов А.А., Манапова А.Қ. Адам мұрын қуысында ауа ағынын сандық модельдеу ..</b>	<b>163</b>
<b>Наурызбаева А.А., Удербаетаева А.Е., Нурахметова К.К. Аддитивті технологияларды зерттеу және енгізу .....</b>	<b>170</b>
<b>Нурланова Б.М., Асетова Л.С., Естай Ғ.З. Жақтары қатты бекітілген серпімді пластинаның иілуі.....</b>	<b>175</b>
<b>Шерьязданов Г.Б. Моделирование ламинарных двухфазных течений вязких сред с усложненными свойствами в электромагнитном поле .....</b>	<b>181</b>
<b>Баймаганбетова Ш.Ж. Туралина Д.Е., Берденова Б.А. Айналатын резервуардағы судың еркін беті.....</b>	<b>185</b>
<b>Качкинова А.К, Берденова Б.А, Туралина Д.Е. Тамшының көлбеу бет бойымен қозғалу мәселесін зерттеу .....</b>	<b>193</b>
<b>Үермекқызы Л., Madibaiuly Zh. Control of vibrations of elastically fixed objects using analysis of eigenfrequencies .....</b>	<b>202</b>
<b>Секция 4. Колебания в механических и робототехнических системах. Машинное обучение и проектирование робототехнических систем. Искусственный интеллект и цифровые технологии .....</b>	<b>209</b>
<b>Мусулманбекова А.Н., Хабиев А.Т. Автоматизация получения винилацетата в микрореакторе .....</b>	<b>210</b>
<b>Қыдырбекулы А. Б., Керимбекова Д.С., Ибраев Г. Е. Исследование нелинейных вынужденных колебаний вертикальных роторных систем на подшипниках качения методом эллиптических функций .....</b>	<b>220</b>
<b>Ким А.В., Аязбаев Г.М., Сундетов Т.Р. Вербальное управление интеллектуальными роботами мультязычным распознаванием голосовой речи .....</b>	<b>227</b>
<b>Ким А.В., Дауылбаева А.М., Рахым Ж. Разработка бизнес-кейсов для лабораторного научно-образовательного комплекса по гуманоидным роботам .....</b>	<b>239</b>
<b>Ким А.В., Толекбаев А.Б., Оспанов Ж.С. Разработка программно - технического комплекса лабораторных работ по промышленным, коллаборативным и антропоморфным роботам.....</b>	<b>245</b>
<b>Сағат К.Қ. Орыс-қазақ машиналық аудармаға арналған full post-editing моделін зерттеу және әзірлеу.....</b>	<b>250</b>
<b>Сағитжанов Б.М., Аманов Б.О. 3D-технология көмегімен нейрондық датчик арқылы басқарылатын бионикалық қолды жобалау .....</b>	<b>258</b>
<b>Сейдахмет Қ.Ж. Жасанды интеллект арқылы жасалынған робот-манипулятор .....</b>	<b>261</b>
<b>Секция 5. Информационные и космические технологии. Инжиниринг и технологии образования. Проблемы и перспективы студенческой науки .....</b>	<b>266</b>