

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫНЫҢ БІЛІМ ЖӘНЕ  
ҒЫЛЫМ МИНИСТРЛІГІ  
Л.Н. ГУМИЛЕВ АТЫНДАҒЫ ЕУРАЗИЯ ҰЛТТЫҚ УНИВЕРСИТЕТІ

КӨЛІК – ЭНЕРГЕТИКА ФАКУЛЬТЕТІ



*«КӨЛІК ЖӘНЕ ЭНЕРГЕТИКАНЫҢ ӨЗЕКТІ МӘСЕЛЕЛЕРІ:  
ИННОВАЦИЯЛЫҚ ШЕШУ ТӘСІЛДЕРІ» ІХ ХАЛЫҚАРАЛЫҚ  
ҒЫЛЫМИ-ТӘЖІРИБЕЛІК КОНФЕРЕНЦИЯСЫНЫҢ БАЯНДАМАЛАР  
ЖИНАҒЫ*

***СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ  
ІХ МЕЖДУНАРОДНОЙ НАУЧНО – ПРАКТИЧЕСКОЙ  
КОНФЕРЕНЦИИ: «АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ТРАНСПОРТА И  
ЭНЕРГЕТИКИ: ПУТИ ИХ ИННОВАЦИОННОГО РЕШЕНИЯ»***

***PROCEEDINGS OF THE IX INTERNATIONAL SCIENTIFIC-PRACTICE  
CONFERENCE «ACTUAL PROBLEMS OF TRANSPORT AND ENERGY:  
THE WAYS OF ITS INNOVATIVE SOLUTIONS»***



Нұр-Сұлтан, 2021

**УДК 656**  
**ББК 39.1**  
**А 43**

**Редакционная коллегия:**

Председатель – Мерзадинова Г.Т., проректор по науке и инновациям ЕНУ им. Л.Н. Гумилева, д.т.н., профессор; Заместитель председателя – Султанов Т.Т., заместитель декана по научной работе, к.т.н., доцент; Сулейменов Т.Б. – декан транспортно-энергетического факультета ЕНУ им. Л.Н.Гумилева, д.т.н., профессор; Председатель «Әдеп» – Ахмедьянов А.У., к.т.н., доцент; Арпабеков М.И. – заведующий кафедрой «Организация перевозок, движения и эксплуатация транспорта», д.т.н. профессор; Тогизбаева Б.Б. – заведующий кафедрой «Транспорт, транспортная техника и технологии», д.т.н. профессор; Байхожаева Б.У. – заведующий кафедрой «Стандартизация, сертификация и метрология», д.т.н. профессор; Глазырин С.А. – заведующий кафедрой «Теплоэнергетика», к.т.н., доцент.

**А 43 Актуальные проблемы транспорта и энергетики:** пути их инновационного решения: IX Международная научно – практическая конференция, Нур-Султан, 19 марта 2021 /Подгот. Г.Т. Мерзадинова, Т.Б. Сулейменов, Т.Т. Султанов – Нур-Султан, 2021. – 600с.

**ISBN 978-601-337-515-1**

В сборник включены материалы IX Международной научно – практической конференции на тему: «Актуальные проблемы транспорта и энергетики: пути их инновационного решения», проходившей в г. Нур-Султан 19 марта 2021 года.

Тематика статей и докладов участников конференции посвящена актуальным вопросам организации перевозок, движения и эксплуатации транспорта, стандартизации, метрологии и сертификации, транспорту, транспортной техники и технологии, теплоэнергетики и электроэнергетики.

Материалы конференции дают отражение научной деятельности ведущих ученых дальнего, ближнего зарубежья, Республики Казахстан и могут быть полезными для докторантов, магистрантов и студентов.

**УДК 656**  
**ББК 39.1**

**ISBN 978-601-337-515-1**

## ДИМЕТИЛ ЭФИРИ ҚОСПАСЫНЫҢ ДИЗЕЛЬДІ ҚОЗҒАЛТҚЫШ ЖҰМЫСЫНЫҢ КӨРСЕТКІШТЕРІНЕ ӘСЕРІН ТЕОРИЯЛЫҚ БАҒАЛАУ

**Қаражанов А.А.<sup>1</sup>, Төребекова С.О.<sup>2</sup>.**

Көлік, көлік техникасы және технологиялары кафедрасының доценті, т.ғ.к<sup>1</sup>,  
2 курс магистранты<sup>2</sup>, Нұр- Сұлтан, Қазақстан

Диметил эфирі физикалық қасиеттері бойынша дизель отынынан айтарлықтай ерекшеленеді, және де энергетикалық тұрғыдан артықшылықтары жоқ. Диметил эфирінің дизель отынынан артықшылығы - оны пайдалану кезінде қозғалтқыштың экологиялық көрсеткіштері едәуір жақсарайды. Диметил эфирінің бұл оң қасиетін пайдалану мақсатымен белгілі-бір пропорцияда оны дизель отынына қосу арқылы пайдаланған газдардың құрамындағы зиянды заттардың мөлшерін азайту ұсынылады. Бұл ретте алынған жаңа отын негізгі көрсеткіштері бойынша дизель отынын пайдаланған кездегі көрсеткіштерге сәйкес келуге және қозғалтқыштың құрылымына айтарлықтай өзгерістер талап етпеуге тиіс. Диметил эфирін қосудың арқасында қозғалтқыш жоғары экологиялық сипаттамаларға ие болады, яғни дизель отынына диметил отынын қосу отынды оттегімен қанықтырудың бір әдісі болып табылады. Бұл ретте отынның түтіндеуге бейімділігі төмендейді және жанудың неғұрлым төмен температураларының есебінен азот оксидтерінің эмиссиясы төмендейді. Осыған байланысты аралас отынның негізгі моторлы және физикалық қасиеттеріне есептік зерттеулер жүргізу және диметил эфирі қоспасының дизель қозғалтқышының жұмысына әсерін теориялық бағалау қажет.

*Қарапайым құрам.* Дизель отынына диметил эфирі қосылған кезде аралас отынның қарапайым құрамы өзгеріске ұшырайды. Аралас отын үшін С:Н:О қатынасы аддитивтік қағида бойынша есептеледі:

$$(1 - \varphi)(C + H + O)_{до} + \varphi(C + H + O) = 1 \quad (1)$$

мұндағы,  $\varphi$  = қоспадағы диметил эфирінің үлесі (массалық),  $(C + H + O)$  – тиісті заттың элементарлық құрамы.

Тиісінше, аралас отынның әр элементінің массалық үлесі тең болады:

$$g_C = (1 - \varphi) g_{Cдо} + g_{CДМЭ} \quad (2)$$

$$g_H = (1 - \varphi) g_{Hдо} + g_{HДМЭ} \quad (3)$$

$$g_O = (1 - \varphi) g_{Oдо} + g_{OДМЭ} \quad (4)$$

мұндағы  $g$  – олардың элементтерінің массалық үлестері.

Оттегі мен көміртегі атомдарының санының тең болуы отын ( $C:O = 1$ ) – ауа қоспасындағы күйенің теориялық пайда болмауының шекті жағдайы болып табылады. Жану өнімдерінде жанбайтын көміртегінің, яғни күйенің пайда болуы, жанармай – ауа қоспасындағы оттегі үлесінің төмендеуіне байланысты.

Қоспаның стехиометриялық құрамы  $\alpha=1$  болған кезде, ауаның артық теориялық коэффициенті  $\alpha_C$  төмендегідей формуламен анықталады:

$$\alpha_C = \frac{1 - \frac{3}{4} g_O / g_C}{2(1 + 3 g_H / g_C) - 3(g_O / 8 g_C)} \quad (5)$$

Кесте 1

Қоспалы отынның қарапайым құрамы

	ДО	ДМЭ	ДО + 10% ДМЭ	ДО + 20% ДМЭ	ДО + 30% ДМЭ	ДО + 40% ДМЭ	ДО + 50% ДМЭ
Элементтердің массалық үлестері							
g <sub>C</sub>	0,873	0,52	0,838	0,803	0,768	0,733	0,698
g <sub>H</sub>	0,127	0,13	0,1273	0,1276	0,1279	0,1282	0,1285
g <sub>O</sub>	-	0,348	0,0696	0,0696	0,1044	0,1392	0,174
α <sub>c</sub>	0,348	0,0167	0,324	0,324	0,310	0,295	0,279

*Қоспаның тұрақтылығы.* Қоспалардың цетан саны аддитивтік әдіс бойынша есептеу жолымен және профессор Г. М. Камфер ұсынған әдіс бойынша анықталды. Айта кету керек, соңғы әдіс дизель отынының спирттермен (метанол, этанол) қоспалары үшін қолданылады және бастапқы нәтижелер тәжірибелік деректермен сәйкес келмеуі мүмкін деп болжайды. Бірақ эксперименттерде таза диметил эфирін емес, техникалық деп аталатындығын ескеру қажет, бұл оның құрамында метанолдың 19% - на дейін болуына мүмкіндік береді және сәйкесінше мәннің өзгеруінің сапалық сипаты қоспаның цетан саны дизель отыны мен алкоголь қоспаларымен бірдей болуы мүмкін.

Аддитивті әдіс:

$$ЦС_{\Sigma} = ЦС_{ДМЭ} * \varphi + ЦС_{ДО} (1 - \varphi) \quad (6)$$

мұндағы, ЦС<sub>ДМЭ</sub> - диметил эфирінің цетан саны 55 бірлікке тең;

ЦС<sub>ДО</sub> - дизель отынының цетан саны;

φ - қоспадағы диметил эфирінің үлесі.

Ал Г.М.Камфер әдісі бойынша:

$$ЦС_{\Sigma} = ЦС_{ДМЭ} * \varphi + ЦС_{ДО} (1 - \varphi) - \Delta ЦС \quad (7)$$

мұндағы, Δ ЦС – түзету саны.

$$\Delta ЦС = [\ln(100 - \varphi) - 1] \ln ЦС_{ДО} \quad (8)$$

Диметил эфирі мен дизель отынының қоспасы үшін стехиометриялық коэффициент мынадай әдістеме бойынша есептеледі:

$$\lambda = \lambda_{ДО} (1 - \varphi) + \lambda_{ДМЭ} \varphi \quad (9)$$

мұндағы λ<sub>ДМЭ</sub> – диметил эфирінің стехиометриялық саны;

λ<sub>ДО</sub> – дизель отынының стехиометриялық саны;

φ - қоспадағы диметил эфирінің үлесі.

*Жану жылуы.* Диметил эфирі мен дизель отыны қоспасының жану жылуы төмендейді. Себебі, дизель отынына қарағанда диметил эфирінің жану жылуының мәні

төмен (43,4 МДж/кг қарсы 27,6 МДж/кг). Есептеу төмендегідей формула бойынша жүргізіледі:

$$H_{U_{\text{қоспа}}} = H_{U_{\text{ДД}}} (1 - \varphi) + \varphi H_{U_{\text{ДМ}}} \quad (10)$$

мұндағы,  $H_{U_{\text{ДО}}}$  – дизель отынының төменгі жану жылуы;

$H_{U_{\text{ДМЭ}}}$  – диметил эфирінің төменгі жану жылуы;

$\varphi$  - қоспадағы диметил эфирінің үлесі.

Диметил эфирінің үлесінің артуымен қоспаның төменгі жану жылуы төмендейді, алайда стехиометриялық қоспаның төменгі жану жылуы аздап артады, өйткені диметил эфирінің жануы аз ауаны қажет етеді. Осылайша, қозғалтқыштың қуат сипаттамаларын сақтау үшін циклдік берілісті арттыру қажет.

*Тұтқырлық.* Тұтқырлық - қозғалтқыш отынының маңызды көрсеткіші. Бұл көрсеткіштен жанармайдың сорылуы ғана емес, сонымен қатар жанармай жабдықтарының жұмысына және оның жану камерасына шашырауына да байланысты, бұл тұтастай алғанда жұмыс процесінің жүруін білдіреді. Тұтқырлық - сұйықтық қабаттарының ішкі үйкелісі, оның бірлік аймақтағы жылдамдығының төмендеуін сипаттайды. Жанармай – эфир қоспасының тұтқырлығы бастапқы заттардың тұтқырлығына байланысты, бірақ оны аддитив қағидасы бойынша есептеу жеткіліксіз болады. Кендалл мен Монро жүргізген зерттеулерде органикалық сұйықтықтардың "идеалды" қоспаларының тұтқырлығы, яғни жылу эффектісі мен көлемінің өзгеруінсіз пайда болатыны зерттелген, қатайту нүктесінің ығысуы идеалды ерітінділерге қатысты заңдарға сәйкес жүреді, тұтқырлықтың құрамға сәйкес тәуелділігі күткендей тұзу емес, қисық сызықты екендігі көрсетілді. Компоненттердің тұтқырлық мәндерінің үшінші дәрежесін қолдану арқылы аддитивтік қағидасын қолдануға болады.

Эмпирикалық теңдеу:

$$\mu_{\text{кc}}^{1/3} = x_1 \mu_1^{1/3} + x_2 \mu_2^{1/3} \quad (11)$$

Қоспаның тұтқырлығын анықтау үшін тұтқырлық логарифмдерін аддитивті деп санаған Аррениус ұсынған басқа эмпирикалық теңдеуді қолдануға болады:

$$\lg \mu_{\text{кc}} = x_1 \lg \mu_1 + x_2 \lg \mu_2 \quad (12)$$

Аррениус массалық (салмақтық) үлестерді пайдалануды ұсынды, бірақ Кендалл моль үлестерін енгізу есептік мәліметтермен жақсы сәйкес келуіне мүмкіндік беретінін дәлелдеді. Сондай-ақ, қоспаның тұтқырлығын анықтау үшін Зданович ұсынған формула бар:

$$\mu_{\text{кc}} = \frac{x_1 \rho_1 + x_2 \rho_2}{x_1 \frac{\rho_1}{\mu_1} + x_2 \frac{\rho_2}{\mu_2}} \quad (13)$$

мұндағы,  $x_1$  және  $x_2$  – қоспа компоненттерінің көлемді үлестері.

Аралас отынның тұтқырлығын анықтаудың біркелкі әдісі болмағандықтан, бұл жұмыста диметил эфирі мен дизель отыны қоспасының тұтқырлығын теориялық есептеу жоғарыда аталған барлық әдістерге сәйкес жүргізілді. Алайда, осы әдістердің ішінде Кендалл ұсынған тәуелділік қанағаттанарлық нәтиже береді.

*Қоспаның тығыздығы.* Диметил эфирінің мөлшері артқан сайын қоспаның тығыздығы сызықтық түрде төмендейді. Отын тығыздығының төмендеуі артық ауа коэффициентінің артуына әкелуі мүмкін, өйткені отын көлемдік көрсеткіштер бойынша мөлшерленеді және аралас отынның салмақтық шығыны дизель отынына қарағанда аз

болады. Алайда, құрамында 30% - ға дейін диметил эфирі бар отынның тығыздығы дизель отыны үшін рұқсат етілген шегінен шықпайтынын атап өткен жөн.

*Фракциялық құрамы.* Диметил эфирінің қоспасын енгізу отынның фракциялық құрамын күрт кеңейтеді. Қоспаны айдаудың орташа температурасын анықтау үшін сипаттамалық фактор қолданылады,

$$K_T = \frac{1.216 \sqrt{T_{op}}}{d_{15}^{15}},$$

мұндағы,  $d_{15}^{15}$  - отынның салыстырмалы тығыздығы ( $t=15^0\text{C}$  кезінде отынның тығыздығы,  $t=15^0\text{C}$  кезінде судың тығыздығына жатады).  $K_T \approx 11...12$  –те тар диапазонда өзгереді. Біздің жағдайда  $K_T$  есептеу  $t=20^0\text{C}$  кезіндегі отынның тығыздығы  $\rho$  пайдаланылды. Жазғы дизель отыны мен диметил эфирі үшін  $K_T$  мәні тиісінше 11,95 және 11,58 тең. Аралас отынның мәні  $K_T$  аддитивтік заңға сәйкес өзгереді деп қабылдаймыз,

$$K_{T_{кс}} = \varphi K_{T_{ДМЭ}} + (1 - \varphi) K_{T_{ДО}}, \text{ одан кейін аралас отынды айдаудың орташа } T_{op} = \left( \frac{K_{T_{кс}} \rho_{cu}}{1,216} \right)^3$$

температурасын табамыз.

## Кесте 2

Аралас отынды айдаудың орташа температурасы

	ДО + 10% ДМЭ	ДО + 20% ДМЭ	ДО + 30% ДМЭ	ДО + 40% ДМЭ	ДО + 50% ДМЭ
$\rho, \text{ кг/м}^3$	822	804	786	768	750
$K_{T_{кс}}$	11,913	11,876	11,839	11,802	11,675
$T_{op}, ^0\text{C}$	249,25	211,15	175,14	141,14	109,98

## Қаныққан будың серпімділік қысымы

Рауль Заңы негізінде диметил эфирінің дизель отынымен қоспасын сұйық күйге келтіру үшін қажетті минималды қысымды орнатуға болады. Диметил эфирі мен дизель отынының молекулалық массасын біле отырып, сұйық фазадағы диметил эфирі мен дизель отыны қоспаларының молярлық концентрациясын формула бойынша анықтаймыз:

$$x_i = \frac{\frac{\varphi_i}{\mu_i}}{\frac{\varphi_{ДМЭ}}{\mu_{ДМЭ}} + \frac{\varphi_{ДО}}{\mu_{ДО}}} \quad (14)$$

## Кесте 3

## Қоспа мен дизель отынының негізгі сипаттамалары

Отынның сипаттамасы	5% ДМЭ+ДО	10% ДМЭ+ДО	20% ДМЭ+ДО	30% ДМЭ+ДО	40% ДМЭ+ДО	50% ДМЭ+ДО	ДО
Элементарлы құрам gC gH gO	0,856 0,127 0,017	0,838 0,127 0,035	0,803 0,128 0,069	0,768 0,128 0,104	0,733 0,128 0,139	0,698 0,129 0,174	0,873 0,127
Тығыздығы, 20°C, кг/м <sup>3</sup>	831	822	804	786	768	750	840-860
Цетан саны, есептеу бойынша	46,10	46,23	46,46	46,91	47,25	47,48	41
Жанудың төменгі жылуы, кДж/кг	42,61	41,82	40,24	38,66	37,08	35,5	42,5
1 кг отынның жану үшін теориялық тұрғыдан қажет ауа мөлшері	14,32	14,04	13,48	12,92	12,36	11,8	14,6
1 кг стехиометриялық қоспа үшін жану жылуы	2,976	2,979	2,985	2,992	3,000	3,008	2,973
Тұтқырлығы 20°C, кг / (мс)	2,650	1,878	1,083	0,707	0,501	0,378	3-6
Қаныққан булардың қысымы 20°C (40°C), МПа	0,0981	0,1704	0,2391	0,3359	0,3823	0,4169	0,003
Үдетудің орташа температурасы	542,11	522,25	484,15	448,14	414,14	382,08	562

Кестеден көріп отырғанымыздай аралас отынның қарапайым құрамы диметил эфирінің үлесінің артуымен өзгереді. Біруақытта көміртегі үлесінің төмендеуі мен оттегі үлесінің жоғарылауы болған кезде сутегінің мәні өзгеріссіз қалады. С:Н шамасы отын үшін 6,74-тен 5% диметил эфирінен 50% диметил эфирі үшін 5,41 диметил эфиріне дейін азаяды (ДТ үшін 6,87), ал С:О арақатынасы осы отын үшін 50,35-тен 4,01-ге дейін өзгереді. Бұл құрамында диметил эфирі көп аралас отындарда қозғалтқыш жұмыс істеген кезде күйе шығарындыларының едәуір төмендеуіне әкеледі. Отындағы оттегі үлесінің артуы 1 кг отынның жануы үшін теориялық тұрғыдан қажетті ауа мөлшерін азайтады (қоспадағы 5% ДМЭ үшін 14,32-ден 50% ДМЭ үшін 11,8-ге дейін), бұл біруақытта төменгі жану жылуының төмендеуіне әкеледі (18% дейін қоспаның құрамында 50% дейін ДМЭ болған кезде), бұл қозғалтқыштың энергетикалық көрсеткіштерін сақтау үшін аралас отынның циклдік берілуін арттыруды талап етеді. Аралас отынның тығыздығы дәстүрлі дизельге қарағанда біршама төмен (қоспада 50% ДМЭ болған кезде 12% дейін). Бұл жағдай артық ауа коэффициентінің ұлғаюына әкелуі мүмкін, өйткені отын көлемдік көрсеткіштер бойынша мөлшерленеді және отынның салмақтық шығыны дизель отынына қарағанда аз болады. Бұл жағдай артық ауа коэффициентінің ұлғаюына әкелуі мүмкін, өйткені отын көлемдік көрсеткіштер бойынша мөлшерленеді және отынның салмақтық шығыны дизель отынына қарағанда аз болады.

Энергия көрсеткіштері мен отын тығыздығын ескере отырып, аралас отынның циклдік жеткізілімінің ұлғаюын төмендегі формула бойынша есептеуге болады:

$$V_{\text{вкс}} = V_{\text{вдд}} \frac{H_{\text{удд}} \rho_{\text{до}}}{H_{\text{уддм}} \rho_{\text{кс}}} = V_{\text{цдо}} K_{\text{беру}}$$

Пайдаланылған әдебиеттер тізімі

1. Филатов А.С. Исследование влияния добавки эфир-альдегидной фракции этилового спирта в дизельное топливо на показатели работы дизельного двигателя: Дисс... канд. техн. наук./А.С.Филатов -Омск, СибГАДА, 2002.
2. Хичик Жозе Антонио Прогнозирование параметров рабочего процесса дизеля при использовании спирто-дизельных топлив: дисс... канд. техн. наук./ Жозе Антонио Хичик -Барнаул, АлтГТУ, 2005.
3. Эсмаилзаде Эбрахим Разработка методов организации рабочего процесса топливной системы дизеля при использовании в качестве топлива диметилового эфира: дисс. кан. техн. наук./ Эбрахим Эсмаилзаде -М.:, МАДИ (ТУ), 2004.
4. D.Gill, H.Ofher and others. Produvition Feasible DME Technology for Direct Injection CI Engine // Speing Fuels and Lubricants Meeting. 2001-5-9-7, Orland. -7p.
5. Ставров А.П. Исследование влияния физических свойств топлив на величину цикловой подачи топливного насоса типа ПК-10 / А.П.Ставров, А.П.Лаврик, Г.М.Белозеров // Труды Челябинского политехнического института. 1981. Вып. 268.-С. 130-132.
6. Хачиян А.С. Применение спиртов в дизелях / А.С.Хачиян // Двигателестроение.-1984.-№8.- С. 30-34.
7. P.Kapus, H .Ofier. D evelopment o f fuel injection equipment and combustion system for DI diesels operated on dimethyl ether. SAE Paper 950062,1995.

УДК 629.02

## БАРАБАНДЫ ТЕЖЕУ МЕХАНИЗМІ ЖӘНЕ ОНЫ ОҢТАЙЛАНДЫРУ

**Қасқатаев Назарым Ғалымжанұлы**

[kaskataev.nazarym@mail.ru](mailto:kaskataev.nazarym@mail.ru)

техника ғылымдарының магистрі, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Нұр-Сұлтан қаласы, Қазақстан Республикасы,

**Жалғасбеков Абзал Зарубаевич**

[abzal579@gmail.com](mailto:abzal579@gmail.com)

техника ғылымдарының кандидаты, доцент Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Нұр-Сұлтан қаласы, Қазақстан Республикасы.

Барабанның тежегіш механизмінде сыртқы цилиндрлік беттерде үйкеліс тежегіш төсемдері бар (әдетте екі), олар жетек құрылғысының әсерінен барабанның ішкі цилиндрлік бетіне басылады. Ең көп таралған барабан тежегіштерінің схемалары суретте көрсетілген. 34. Олар жетек құрылғыларының түрі мен саны, сондай-ақ электродтардың еркіндік дәрежелерінің саны бойынша жіктеледі. Егер бекітілген геометриялық осьтің айналасында бұрылса, электродтың бір еркіндік дәрежесі болады. Бұған колодканың калипперге бекітілген осімен топсалы байланысы немесе колодканың радиустық ұшын калиппердің тиісті цилиндрлік ұясына орналастыру арқылы қол жеткізіледі.

Екі еркіндік дәрежесі бар электродтарда олардың айналуының геометриялық осі қозғалу мүмкіндігіне ие, бұл электродтың өзін-өзі орнатуына мүмкіндік береді, сондықтан оның барабанға жақсырақ орналасуын және төсемнің біркелкі тозуын қамтамасыз етеді. Екі еркіндік дәрежесі бар электродтар дөңгелек ұшымен калиппердің көлбеу жазықтығына сүйенеді және оның бойымен сырғанады немесе аралық буынның көмегімен соңғысына