

УДК 621.1

КӨП ТЕКШЕЛІ ЖЫЛУЛЫҚ МАШИНАНЫҢ ТҰРМЫСТЫҚ ЖӘНЕ ӨНДІРІСТІК ПАЙДАЛАНУЫНЫҢ МАТЕМАТИКАЛЫҚ МОДЕЛІН ҚҰРУ

Ахан Абылайхан Еділұлы
abylaikhanakhan@gmail.com

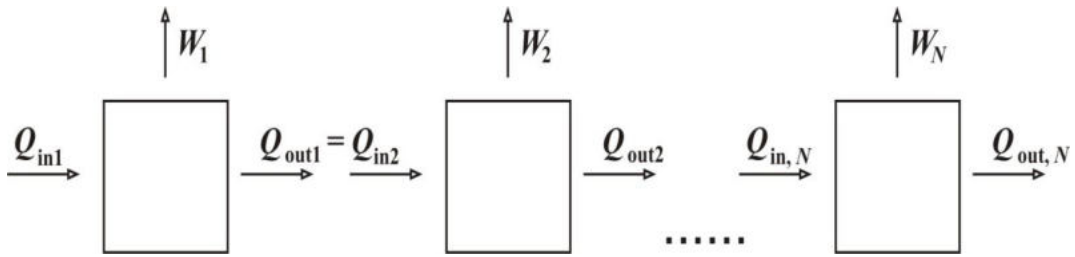
Л.Н. Гумилев атындағы Евразиялық ұлттық университетінің жылуэнергетикасы
факультетінің 2 курс магистранты, Нұр-Сұлтан, Қазақстан

Түйіндеме: Зерттеудің негізгі мақсаты: көп текшелі жылулық машинасының жұмыс істеу принципін қолдану арқылы ПӘК көрсеткішін арттыру. Ғылыми жаңалығы: отын көзі ретінде қайнау температурасы өз климатымызға жақын температуралық газдар қосылыстарын қарастыру. Нәтижесінде қазіргі уақытта ПӘК мөлшерінен біршама тиімді көрсеткіштің жуықтап есептелуі пайда болды.

Түйіндеме сөздер: газдар, текшелі жылу машина, ПӘК, төменгі температурада қайнау.

Кіріспе. Осыдан 110 жыл бұрын алғашқы көп текшелі машиналар ұсынылған болатын. Олардың әр текшесі қарапайым жылу машинасының жұмыс істеу принципіне ұқсас. Бірақ, ол заманда мұнай мен көмір өте арзан болғандықтан көп текшелі машиналарды қолдануы қымбатқа түсетін еді. Сол себепті ол уақытта мүлдем бағаланбаған болатын. Қазіргі уақытта энерготасымалдағыштардың мен энергия құнының жыл сайын өсе беруіне байланысты, күн, жел, жер, толқын энергияларын қолданысқа енгізу перспективасы көп қарастырылуда. Сонымен қатар, жылу энергиясын механикалық жұмысқа терең түрлендіру қажеттілігі туындайды. Осының бәрін көп текшелі жылу машиналарында жасауға болады, онда әрбір сатыда қайнау температурасы төмен газ қосылыстарын жұмыс денесі ретінде қолданамыз. T_h температурасы газ қосылыстарын арасында негізгі отын болатын бағытын көрсететін шама. Сол себепті T_b қайнау температурасының көрсеткіші T_h температурасынан жоғары болуы керек. Мысал ретінде қайнау температурасы 2-фторбутан $T_b = 298,15$ К, фосген $T_b = 281,45$ К, иод гептафторидын $T_b = 277,95$ К немесе фтордихлорметилгипофторин $T_b = 273,15$ К қарастыруға болады[1]. Тандалған газдардың қатты фазаға өту температурасы конденсациялану температурасына жақын болғандықтан, жылу машинасындағы температура мен қысым газдың қатты түріне өтпейтіндей жағдай жасау керек.

Негізгі бөлім. Жалпы көп текшелі жылу машинасының жалпы термодинамикалық суреті 1-сұлбада көрсетілген.



1-сұлба. N сатыдан тұратын жылу машинасының схемасы

Ол N текше санынан тұратын жылу машиналарың қосындысы. Әр жылу машинасы өз номерін i , жылу қолданысын $Q_{in,i}$, артық жылу өткізуін $Q_{out,i}$, жұмыс өндірісін W_i , және пайдалы әсер коэффициентінен тұрады:

$$\eta_i = 1 - \frac{Q_{out,i}}{Q_{in,i}}, \quad i = 1, 2, \dots, N. \quad (1)$$

Жылу машинасының кірісіне Q_{in1} жылу беріліп, қоршаған ортаға бөлінген жылу $Q_{out,N}$ шамасына тең болады. Бірінші жылу машинадан бөлінген жылу Q_{out1} екінші және келесі машиналардың жұмыс денесін қыздыру қызметін атқарады.

(1) теңдігінен:

$$Q_{out,i} = Q_{in,i+1}, \quad i = 1, 2, \dots, N-1.$$

Осыдан көп текшелі жылу машинасы үшін ПӘК η формуласын:

$$\eta = 1 - (1 - \eta_1)(1 - \eta_2) \dots (1 - \eta_N). \quad (2)$$

Жылу машиналарының текше саны артқан сайын ПӘК көрсеткіші арта береді. Осы жерден қарапайым жылу машиналарының ұлғаюына қарай пәк жоғарылауы керек: жақшаларда барлық сандар бірліктен аз және олардың туындылары N нөмірінің ұлғаюымен тез азаяды.

Жоғарыда көрсетілген мәселе 1) тізбекті жылу машинасында келесі факторлардың арқасында шешіледі:

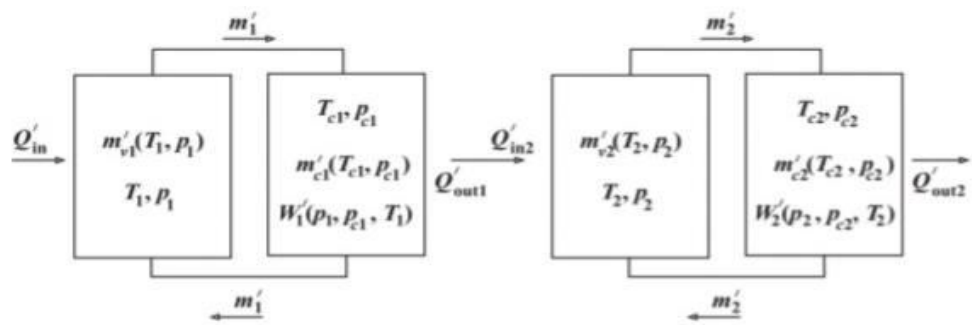
- энергияны түрлендірудің әрбір кезеңінде қайнау температурасы төмен газдар қолданылады, бұл термодинамикалық циклдың төменгі температурасын төмендетуге мүмкіндік береді;

- тізбектің соңғы буынының термодинамикалық циклінің төмен температурасы және шығарылатын жылудың төмендеуі N нөмірі бар машина конденсаторының мөлшері мен массасының төмендеуіне ықпал етеді.

Бірінші контурдағы сұйықтық пен бу қоспасы c_1 жылу сыйымдылығымен, ρ_1 тығыздығымен, μ_1 молярлық массасымен және L_1 булану жылуымен сипатталады. Бірінші контурдағы заттың жылу жағдайы SG бу генераторындағы T_1 температурасымен және жылу алмастырғыштың сол бөлігіндегі (конденсатордағы) T_{c1} температурасымен сипатталады. Бу генераторындағы қысым p_1 , конденсатордағы қысым p_{c1} шамаларымен белгілейміз.

Сәйкесінше екінші контурдағы сұйықтық пен бу қоспасы c_2 жылу сыйымдылығымен, ρ_2 тығыздығымен, μ_2 молярлық массасымен және L_2 булану жылуымен сипатталады. Екінші контурдағы заттың жылу күйі жылу алмастырғыштың оң бөлігіндегі T_2 температурасымен және T_2 турбинасындағы және конденсатордағы T_{c2} температурасымен сипатталады. Бу генераторындағы қысым p_2 , конденсатордағы қысым p_{c2} шамаларымен белгілейміз.

Жылу машинасының математикалық моделін құр негізгі параметрлер 2-сұлбада келтірілген.



2-сұлба. 2 текшелі жылу машинасы мен оның параметрлері

Белгіленуі: m'_{v1}, m'_{v2} – бірінші және екінші контурдағы буланудың массалық жылдамдығы[7].

Сонда энергияны сақтау заңын теңдеулер жүйесі түрінде жазуға болады:

$$\begin{aligned} \rho_1 c_1 V_{G1} \frac{dT_1}{dt} &= Q'_{in} - m'_1 c_1 (T_1 - T_{c1}) - m'_{v1} L_1, \\ \rho_1 c_1 V_{H1} \frac{dT_{c1}}{dt} &= -W'_1 + m'_1 c_1 (T_1 - T_{c1}) + m'_{c1} L_1 - Q'_{out1}, \\ \rho_2 c_2 V_{G2} \frac{dT_2}{dt} &= Q'_{in2} - m'_2 c_2 (T_2 - T_{c2}) - m'_{v2} L_2, \\ \rho_2 c_2 V_{H2} \frac{dT_{c2}}{dt} &= -W'_2 + m'_2 c_2 (T_2 - T_{c2}) + m'_{c2} L_2 - Q'_{out2} \end{aligned} \quad (3)$$

Бұл жерде t – уақыт; m'_{c1}, m'_{c2} – бірінші және екінші контурдағы бу конденсациясының массалық жылдамдығы. (4) теңдеулерге жылу алмастырғышта интегралды жылу ағындарының теңдігі шарты қосылады

$$Q'_{out1} = Q'_{in2} \quad (4)$$

Теңдеулер (4) машинадағы жылу процестерінің физикалық көрінісін қатты жеңілдетеді. Бірақ олар жалпы олардың физикасын дұрыс сипаттайды. Булану және конденсация жылдамдығының теңдігі орындалатын стационарлық режимді жеңілдету үшін қарастырайық:

$$m'_{v1} = m'_{c1}, \quad m'_{v2} = m'_{c2} \quad (5)$$

Осыдан:

$$Q'_{in1} - W'_1 - W'_2 = Q'_{out2}$$

Бұл теңдеу энергияның интегралды түрде сақталу заңын білдіреді, себебі бу сұйықтығының ішкі энергиясының өзгеру жылдамдығы нөлге тең

Буланатын массаның ағыны J (кг/м²с) сұйықтық бетінен Герц-Кнудсен теңдеуімен беріледі [2]

$$J = \alpha \sqrt{\frac{\mu}{2\pi RT}} (p_s - p)$$

Бұл жерде α – аккомодация коэффициенті, $0 < \alpha \leq 1$; R – универсалды газ тұрақтысы, $R = 8.314$ Дж/(моль·К); p – сұйықтық буларының нақты қысымы; p_s – температурадағы булардың тепе-тең қысымы T , Клапейрон-Клаузиустың белгілі бір теңдеуімен.

Бу генераторында SG булану процесін модельдеу үшін Герц – Кнудсен теңдеуін қолданамыз. Сұйықтық бетінен түсетін бу массасының саны S_{v1} уақыт бірлігі үшін тең

$m'_{v1} = S_{v1}J$. Бу генераторынан кететін будың массалық жылдамдығы m'_{v1} . Бұл масса бу массасының өсу жылдамдығына тең болуы тиіс dM_1/dt :

$$\frac{dM_1}{dt} = m'_{v1} - m'_1, \quad m'_{v1} = S_{v1}\alpha \sqrt{\frac{\mu_1}{2\pi RT_1}}(p_{s,v1} - p_1),$$

$$p_{s,v1} = p_{01} \exp \left[\frac{L_1\mu_1}{R} \left(\frac{1}{T_{01}} - \frac{1}{T_1} \right) \right],$$
(6)

Бул жерде p_{01} - температура кезінде будың тепе-тең қысымы T_{01} .

Бу көлемінің V_{v1} және температураның T_1 өзгерісінің елемеуімен бу қысымының өзгеруімен салыстырғанда p_1 , Менделеев-Клапейрон теңдеуінің көмегімен $p_1V_{v1} = M_1RT_1/\mu_1$ теңдікті осылай жазсақ болады [5]:

$$\frac{dp_1}{dt} \approx \frac{RT_1}{\mu_1V_{v1}} \frac{dM_1}{dt}$$

Оны бірінші теңдеумен бірге қарастыра отырып (7), онда

$$\frac{dp_1}{dt} = \frac{RT_1}{\mu_1V_{v1}}(m'_{v1} - m'_1)$$
(7)

Қысымды есептеу үшін теңдеулер ұқсас жолмен алынады p_{c1} , онда бірінші контурдағы конденсатордағы конденсация жылдамдығы m'_{c1} :

$$\frac{dp_{c1}}{dt} = \frac{RT_{c1}}{\mu_1V_{c1}}(m'_{c1} - m'_1)$$
(8)

$$m'_{c1} = S_{c1}\alpha \sqrt{\frac{\mu_1}{2\pi RT_{c1}}}(p_{s,c1} - p_{c1}), \quad p_{s,c1} = p_{01} \exp \left[\frac{L_1\mu_1}{R} \left(\frac{1}{T_{01}} - \frac{1}{T_{c1}} \right) \right],$$

S_{c1} , V_{c1} – конденсация беті және бу көлемі.

Екінші контуры булану бетімен S_{v2} және бу көлемімен сипатталып V_{v2} , жылу алмастырғыштың оң бөлігінде, конденсация бетінде S_{c2} және бу көлемімен V_{c2} конденсаторда сипатталады. Буландырғыштағы қысым p_2 мен конденсатордағы p_{c2} қысым:

$$\frac{dp_2}{dt} = \frac{RT_2}{\mu_2V_{v2}}(m'_{v2} - m'_2)$$
(9)

$$m'_{v2} = S_{v2}\alpha \sqrt{\frac{\mu_2}{2\pi RT_2}}(p_{s,v2} - p_2), \quad p_{s,v2} = p_{02} \exp \left[\frac{L_2\mu_2}{R} \left(\frac{1}{T_{02}} - \frac{1}{T_2} \right) \right],$$

$$\frac{dp_{c2}}{dt} = \frac{RT_{c2}}{\mu_2V_{c2}}(m'_{c2} - m'_2)$$

$$m'_{c2} = S_{c2}\alpha \sqrt{\frac{\mu_2}{2\pi RT_{c2}}}(p_{s,c2} - p_{c2}), \quad p_{s,c2} = p_{02} \exp \left[\frac{L_2\mu_2}{R} \left(\frac{1}{T_{02}} - \frac{1}{T_{c2}} \right) \right],$$

Жұмыс қуатын W_1', W_2' будың тығыздықтары арқылы ρ_{v1}, ρ_{v2} бірінші және екінші контурдағы қысымның өзгеруі байланысты механикалық жұмысқа пропорционалды [9]:

$$W_1' = \delta_1 \frac{m_1'}{\rho_{v1}} (p_1 - p_{c1}), \quad W_2' = \delta_2 \frac{m_2'}{\rho_{v2}} (p_2 - p_{c2}) \quad (10)$$

δ_1, δ_2 – бу турбиналарының пайдалы әсер ету коэффициенттері T_1 және T_2 . ρ_{v1} және ρ_{v2} тығыздықтары бу күй теңдеуін пайдалана отырып есептеледі:

$$\rho_{v1} = \frac{p_1 \mu_1}{RT_1}, \quad \rho_{v2} = \frac{p_2 \mu_2}{RT_2} \quad (11)$$

Теңдеу (3), (4), (6) – (11) толық жүйені құрап, барлық белгісіз айнымалыларды табуға мүмкіндік береді. Оларды шешу үшін Эйлер – Кромер әдісі қолданылды [3]. Берілген теңдеу параметрлердің үлкен санын қамтиды, олардың ішінде m_1', m_2' құрылғы шығынының жылдамдығын ерекше орын алады. Барлық параметрлерді келесі шарттарды қанағаттандыру үшін таңдау қажет: 1) жүйе стационарлық режимге ұмтылуы тиіс; 2) тұрақты режимде булану мен конденсацияның жаппай жылдамдығы оң сандар болуы тиіс; 3) қарапайым жылу машиналарындағы жұмыс денесінің температурасы үнемі қатты фазаға өту температурасынан жоғары болуы тиіс. Жылу машинасының жұмыс істеу режимдерінің бірін келтіреміз.

Қорытынды. Уақытты қысқартуға стационарлық мәндерге жақын бастапқы жағдайларды таңдаумен қол жеткізіледі, олар бірінші сынама есептеуден кейін бағаланады. Қысым өлшемсіз түрде ұсынылған:

$$\bar{p}_1 = \frac{p_1}{p_{01}}, \quad \bar{p}_{c1} = \frac{p_{c1}}{p_{01}}, \quad \bar{p}_2 = \frac{p_2}{p_{02}}, \quad \bar{p}_{c2} = \frac{p_{c2}}{p_{02}}$$

T_1, T_{c1}, T_2 и T_{c2} температураларының арасындағы айырмашылық аз болғандықтан, математикалық модель дәрекі және термодинамикалық параметрлер мен механикалық жұмыстың дәл есебін жүргізуге мүмкіндік бермейді. Сондықтан нақты жағдайларда пәк жоғарылауы мүмкін, бу турбиналы қондырғылар пәк = 0.3 және одан жоғары болуы мүмкін [8].

Бірінші η_1 және екінші η_2 контурда жуықтап алған есептемелермен $\eta_1 = W_1'/Q'_{in1}$ и $\eta_2 = W_2'/Q'_{in2}$. Бұл Карно 0.49 және Ренкин 0.19 формуласы бойынша есептелген термиялық ПӘК айтарлықтай аз. Ренкин мен Карно циклінің пәк арасындағы күшті айырмашылықтың нақты бу турбиналық қондырғылары үшін байқалмайды [4]. Құрастырылған модель бойынша және жуықталып есептелген $N = 2$ сатысындағы ПӘК шамасы:

$$\eta = 1 - (1 - 0.49)(1 - 0.19) = 0.58.$$

Жоғарыда берілген тізбекті жылу машинасы жылу энергиясын механикалық немесе электр энергиясына неғұрлым толық көлемде түрлендіруге қабілетті, оның ПӘК-і бірлікке жақын болуы мүмкін. Жақындатылған модельдеу тұтастай алғанда дәл қазіргі уақыттағы перспективасын көрсетіп тұр. Машина буының ұлғаюымен оның салмағы да өседі. Бірақ сонымен бірге пайдалы жұмыс өндірісі де өсуде, сонымен қатар соңғы буындағы конденсатордың массасы төмендейді [8]. Сондықтан тізбекті жылу машинасының тиімділігін арттыру туралы айтуға болады. Машина күрделілігінің және оның жұмысын басқарудың пайда болатын кедергі, ол электрондық техника мен автоматиканы дамытудың қазіргі заманғы деңгейінде шешілуі мүмкін.

Қолданылған әдебиеттер тізімі

1. https://ru.m.wikipedia.org/wiki/Список_газов
2. Кнаке О., Странский И. Н. Механизм испарения // Успехи физических наук. 1959. Т. LXVIII, вып. 2. С. 261 – 3053.
3. Поляков В. В., Скворцов Л. С. Насосы и вентиляторы. – М.: Стройиздат, 19904. Евланов Е. Н., Завьялов М. А., Тюрюканов П. М. Электронные пушки для космических аппаратов // Космические исследования, 2013, том 51, № 5, с. 428-435.
4. Кудинов В. А. Техническая термодинамика. – М.: Высшая школа, 2000.
5. Сивухин Д. В. Термодинамика и молекулярная физика. – Москва: Наука, 1976.
6. Варгафтик Н. Б. Справочник по теплофизическим свойствам жидкостей и газов: М.: Наука, 1972.
7. Куландин А. А., Тимашев С. В., Иванов В. П. Энергетические системы космических аппаратов. – М.: Машиностроение, 1979.
8. Allison P. R. What will power tomorrow's spacecraft? // <http://www.bbc.com/future/stor/20160119-what-will-power-tomorrows-spacecraft>, 20 January 2016.