

## 4 ЖЕЛДЕТУ ЖЕЛІЛЕРІ

### 4.1 Желдету желілерін талдау

#### 4.1.1 Желдету қосылыстарының жалпы сипаттамасы

Желдету желісі әртүрлі пішіндегі, қимадағы және ұзындықтағы ауа жолдарының бір-бірімен байланыспайтын желдеткіштерден тұратын жүйені білдіреді. Жүйенің негізгі тағайындауы - әкімшілік ғимараттарда, мекемелерде, өндірістік жайларда, цехтарда, жұмыс орындарында, сыртқы атмосфералық ауасы бар жер асты тау қазбасында ауа ортасын талап етілген алмасуды қамтамасыз ету. Желдету жүйесі әдетте квазистационарлық жағдайда болады. Өр болған жағдайда, желдету құрылысының, желдету жүйесінің термодинамикалық және аэродинамикалық ұйытқулары бұзылған кезде стационарлық емес күйге ауысады. Желдету жүйесінің қабілеттілігі қалыпты және апатты жағдайда желдетудің қажетті режимі оның сенімділігінің дәрежесін сипаттайды және желдету маңызын жобалау барысында есеп беруді түсінуден және оның теориялық негіздеріне байланысты, сондай-ақ өндіріс жағдайында ауа ағындарын бөлуді басқару кезінде дұрыс шешімдер қабылдауға да байланысты.

Желдету желісі желдету жоспары немесе есептік аэродинамикалық сұлба түрінде берілуі мүмкін.

*Желдету жоспары* – бұл өндірістік және әкімшілік жайларда ауа жолдарының орналасу жоспары, онда шартты белгілермен ауа ағындарының бағыты, реттеуші құрылғылар мен құрылыстар, бақылау-өлшеу пункттері және т.б. берілген.

*Есептік аэродинамикалық сұлба* – бұл өзара байланысқан тораптар мен тармақтардың белгіленген түрінде нақты желдету желісінің көрінісі (желдету жоспары). Аэродинамикалық сұлба өзара байланысқан бағандарды білдіреді, ол үшін келесі ұғымдар қабылданады:

- *торап* – үш және одан артық ауа жолдарының қосылысқан жері;
- *тармақ* – екі торапты қосатын жеке ауа жолы;
- *маршрут* – қайталанбайтын тармақтарды қосатын желдету желісіне апаратын жол;
- *контур* – қайталанбайтын тармақтарды қосатын желдету желісіне апаратын тұйық жол.

Кез келген аэродинамикалық сұлба үшін келесі топологиялық тәуелдіктер болады:

$$K = n - (N - 1), \quad (4.1)$$

мұнда  $K$  – есептік аэродинамикалық сұлбадағы тәуелсіз контурлар саны, яғни бір-бірінен жаңа тармақпен ерекшеленетін контурлар саны;  
 $n$  – есептік аэродинамикалық сұлбадағы тармақтар саны;  
 $N$  – есептік аэродинамикалық сұлбадағы тораптар саны.

Күрделі желдету сұлбасы үшін тәуелсіз контурлардың мәні желдету ағындарын басқару және желідегі ауаны бөлу міндеттерін шешу кезінде қажет. Желдету желісін сипаттайтын теңдеулер жүйесі, егер оның құрамындағы сызықтық емес теңдеулер саны тәуелсіз контурлар санына тең болса түйықталады.

Ауаны бөлу талдауымен байланысты желдету есептерінің шешімі есептік аэродинамикалық сұлбаны салудан басталады, яғни натурада ауа жолдары қосылыстарының күрделі комбинациясынан қағаздағы қарапайым сызықтардың үйлесіміне көшуден басталады.

Есептік желдету сұлбасын салу мынадай. Берілген объектінің желдету жоспарында желдету барлық тораптық нүктелері (үш және одан артық ауа жолдары тоғысатын жерлер) болады және белгіленген тәртіпте номерленеді. Содан кейін барлық тораптық нүктелер қағаз бетіне салынады және натураға сәйкес келетін тәртіптегі сызықтар бір-бірімен қосылады.

Екі торап арасында қосылған сызық тармақ деп аталады, оның физикалық элементі желдету жоспарына сәйкес келетін ауа ағынының учаскесі болып табылады.

Тармақтарды кодтау үшін үш орынды  $k, i, j$  предикат пайдалану керек, мұнда  $k$  – тармақтарды номерлеу,  $i$  және  $j$  – тармақтардың басы мен аяғын номерлеу. Атмосферамен байланысы бар ауа жолының бас немесе аяғы олардың реттік номеріне қарамастан 1 цифрмен белгіленеді.

Барлық тармақтардың элементарлық кодтарының тізімі арнайы кестеге енгізіледі және бір уақытта бастапқы деректерді құрастырып, желі топологиясын толықтай анықтайды.

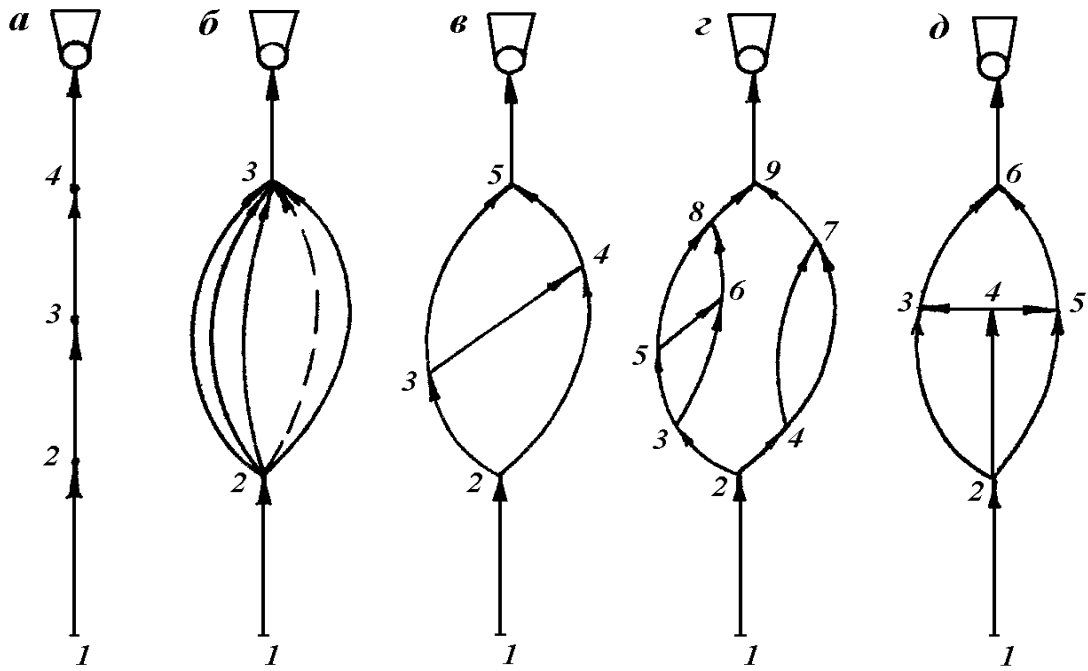
#### 4.1.2 Желдету қосылыстарының типтері

Байланыс тәсілдеріне байланысты желдету ағындарының және ауа жолдарының бірізділікті, параллель, диагональ, аралас және күрделі қосылыстары деп ажыратады.

*Бірізділікті қосылыстар* (4.1, а-сурет) – барлық ауа жолдары өзара бүйірлік тармақталусыз қосылады.

*Параллель қосылыстар* (4.1, б-сурет) – бір торапта тармақталатын және өзара қосымша желдету арналарымен немесе құбыр жолдарымен қосылмайтын барлық ауа жолдары бір жалпы торапқа қосылады.

*Диагональ қосылыс* (4.1, в-сурет) – торап пункттерінен басқа екі параллель ауа жолында қосымша байланыстар болады, олар *диагональ деп аталады*.



4.1-сурет. Ауа жолдары қосылысының сұлбасы

Жоғарыда аталған сұлба комбинациясы *аралас сұлбаны* құрайды (4.1, г-сурет).

Егер желдету қосылысын жоғарыда аталғандардың ешқайсысына апару мүмкін болмағанда, онда оны *күрделі* ретінде жіктейді (4.1, д-сурет).

### 4.1.3 Желдету желісінің негізгі заңдары

Желдету желісіндегі ауа қозғалысы екі негізгі заңға бағынады.

Бірінші заң – массаны сақтау заңы. Тораптағы ауа мөлшерінің алгебралық қосындысы нольге тең.

Аталған заң ауа ағындары қозғалысының үздіксіздік шартының өрнегі болып табылады, соған байланысты 4.2, а-суреттегі берілген сұлба үшін былай жазуға болады

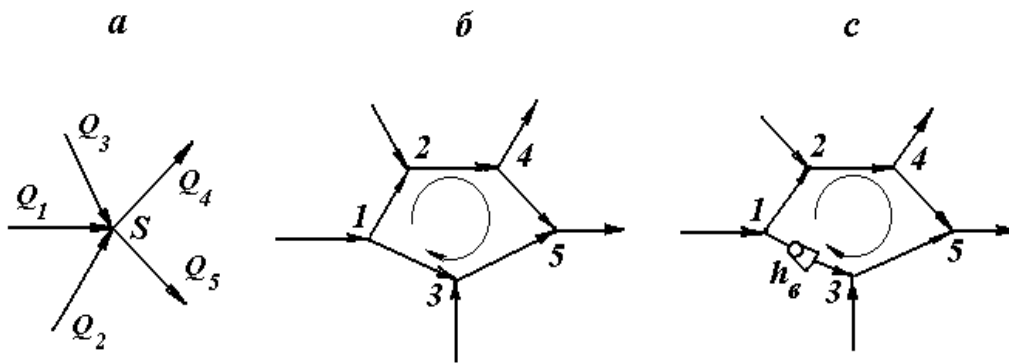
$$Q_1 + Q_2 + Q_3 - Q_4 - Q_5 = 0$$

немесе жалпы жағдайда

$$\sum_S Q_i = 0, \quad (4.2)$$

мұнда  $S = 1, 2, 3, \dots, N$  – тораптарды номерлеу;

$i = 1, 2, 3, \dots, n$  – тармақтарды номерлеу.



4.2-сурет. Желінің негізгі заңдарын түсіндіруге арналған сұлба

Екінші заң – энергияны сақтау заңы. Тартым көздері депрессиясының алгебралық қосындысы тұйық контурдағы барлық тармақтар депрессиясының алгебралық қосындысына теңеледі. Тартым көздері болмаған кезде – тұйық контурдағы барлық тармақтар депрессиясының алгебралық қосындысы теңге болады.

Тұжырымдалған заңды дәлелдеу үшін 4.2, б-суретте келтірілген шығындармен бағдарланған контурды қарастырамыз.  $P_1, P_2, P_3, P_4$  және  $P_5$  арқылы тораптардағы қысымды белгілейміз. 1-2-4-5 және 1-3-5 маршруттар бойынша ауа ағындарының қозғалысы кезінде арын шығынын анықтаймыз.

1-2 тармақтағы депрессия 1 мен 2 тораптағы қысым айырымы ретінде анықталады

$$h_{1,2} = P_1 - P_2.$$

2-4 және 4-5 тармақтағы депрессия тең болады

$$h_{2,4} = P_2 - P_4;$$

$$h_{4,5} = P_4 - P_5.$$

Қысымның жалпы шығыны таңдап алынған маршруттың әрбір элементінде жоғалтатын қысым айырымының қосындысына тең, яғни

$$h_{1,2} + h_{2,4} + h_{4,5} = P_1 - P_5. \quad (4.3)$$

1-3-5 маршруттарының қатынасын осыған ұқсас талқылай отырып, мынаны аламыз

$$h_{1,3} + h_{3,5} = P_1 - P_5. \quad (4.4)$$

(4.3) және (4.4) өрнектерде оң жақ бөліктер тең, солай сол жақ та тең болады, сондықтан

$$h_{1,2} + h_{2,4} + h_{4,5} = h_{1,3} + h_{3,5}$$

немесе

$$h_{1,2} + h_{2,4} + h_{4,5} - h_{3,5} - h_{1,3} = 0,$$

осыны дәлелдеу қажет.

Жоғарыда баяндалған дәлелдер контурда тартым көздері байқалатын жағдай үшін таралады. Бұл жағдайда арындағы қосынды шығыны оның барлық көздерінің келуіне тең болады. Мысалы, 1-2-4-5-3-1 контур үшін (4.2, с-сурет)

$$h_{1,2} + h_{2,4} + h_{4,5} - h_{3,5} - h_{1,3} + h_6 = 0.$$

Жалпы жағдайда,  $h_i = R_i Q_i^2$  түрінде,  $L$ -лі контур үшін желінің екінші заңы былай жазылады:

$$\sum_L \varepsilon \cdot R_i Q_i^2 + \varepsilon \cdot h_L = 0, \quad (4.5)$$

мұнда  $L = 1, 2, 3, \dots, K$  – тәуелсіз контурларды номерлеу;

$h_L$  –  $L$ -лі контурда тартым көздерінің депрессиясы;

$\varepsilon$  – ауа ағындары бағытының коэффициенті. Ауа қозғалысының бағыты бар контурдың келуінің сәйкес келуі кезінде тармақ үшін

$\varepsilon = 1$ , сәйкессіздік кезінде  $\varepsilon = -1$ . Ауа берілісінің бағыты бар контурды айналып өтуге сәйкес келген кезде тартым көздері үшін  $\varepsilon = -1$ ,

сәйкессіздік кезінде  $\varepsilon = 1$ .

Жоғарыда баяндалғандарға қосымша тағы да бір маңызды қасиет бар, ол желінің екінші заңы салдарынан туындайды.

*Желдету желісіндегі кез келген нүктедегі қысым аталған сұлбада оның орналасқан орнымен анықталады, қарастырылатын ауа ағыны қандай жолмен аталған нүктеге қалай дәл түсетініне байланысты.*

Шынында, егер бұлай болмаса, онда ертерек таңдап алынған нүктеге әртүрлі маршруттар бойынша қозғала отырып, сол және басқа уақытта қысым айырымын өлшеу қажет болса, бұл мүмкін емес. Егер желдету желісіндегі нүктелердің жағдайы көрсетілген болса, онда кез келген жол бойынша олардың арасындағы депрессия сол күйінде қалады. Параллель тармақтар депрессиясы және шартты параллель бағыттар әрдайым өзара тең болуымен түсіндіріледі.

Соңғы жағдайда *шартты параллель бағыттар деп* желдету қосылысындағы маршруттар аталады, шеткі жалпы нүктелерден басқа өзара қосымша аэродинамикалық байланыстары білдіреді.

Желінің екінші заңын қолдану кезінде келесі ережелер басшылыққа алынады.

1. Контурды айналып өту бағыты беріледі.

2. Тармақ депрессиясы, ағын бағыты контурды айналып өту бағытымен сәйкес келмесе, теріс деп саналады.

3. Тартым көздерінің депрессиясы тұйық контурда ауа жолдары депрессиясына қатынасы бойынша әрдайым кері белгісі болады.

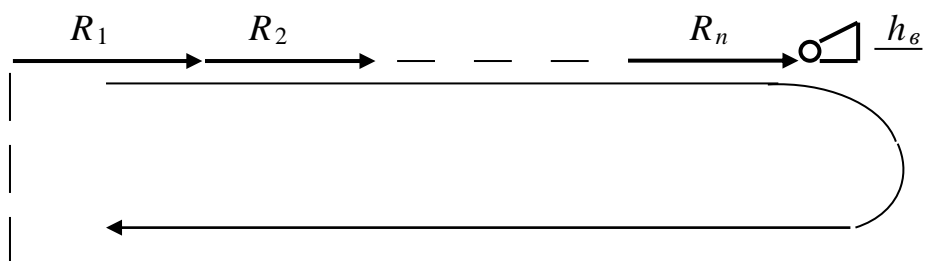
Бірінші және екінші заңдар негізінде құралған теңдеулер жүйесі желдету желісінде кез келген күрделілікте ауаның бөлінуін сипаттайды және мына түрде болады

$$\begin{cases} \sum_s Q_i = 0; \\ \sum_L \varepsilon \cdot R_i Q_i^2 + \varepsilon \cdot h_L = 0. \end{cases} \quad (4.6)$$

Жүйе шешімі (4.6) желдету желісінде барлық элементтерде ауаның күрделілігіне және өлшемділігіне қарамастан ауаның белгісіз шығындарын береді. Сол уақытта қарастырылатын теңдеулердің жүйесін табысты іске асыру ақпараттардың үш көздерінің барлығымен байланысты: желдету желісіндегі есептік аэродинамикалық модель; есептік модельге тармақтардың аэродинамикалық кедергісінің массиві; тартым көздері туралы деректер.

#### 4.1.4 Ауа жолдарының бірізділікті қосылысы

Ауа жолдарының бірізділікті қосылысын (4.3-сурет), егер оның ұшы мен шартты тармақтың басын нольдік кедергімен байланыстырса, тұйық контур түрінде беруге болады.



4.3-сурет. Ауа жолының бірізділікті қосылысының есептік сұлбасы

Ауа тармағы бойынша өтетін саны үздіксіздік шартының күшімен мына шартқа бағынатын болады

$$Q_1 = Q_2 = Q_3 = \dots = Q_n = Q_g. \quad (4.7)$$

Контурды айналып өтудің берілген бағыты үшін желінің екінші заңына сәйкес келесі теңдік әділ болады

$$(R_1 + R_2 + \dots + R_n) Q_g^2 = h_g,$$

немесе

$$h_{\epsilon} = R_{o\delta} Q_{\epsilon}^2. \quad (4.8)$$

Осы жерде  $n$  ауа жолына бірізділікті қосылған  $h_{o\delta}$  депрессия және  $R_{o\delta}$  жалпы кедергісі мына формулалар бойынша анықталады:

$$R_{o\delta} = R_1 + R_2 + \dots + R_n; \quad (4.9)$$

$$h_{o\delta} = h_1 + h_2 + \dots + h_n, \quad (4.10)$$

мұнда  $R_1, R_2, \dots, R_n$  – бірізділікті қосылысқа енетін ауа жолдарының аэродинамикалық кедергісі;

$h_1, h_2, \dots, h_n$  – бірізділікті қосылысқа енетін ауа жолдарының депрессиясы.

Есептің әрі қарай шешімі  $h_{\epsilon}$  желдеткіш депрессиясының қандай түрде берілгеніне байланысты. Егер  $h_{\epsilon} = const$ , онда (4.8) ұсынылады

$$Q_{\epsilon} = \sqrt{\frac{h_{\epsilon}}{R_{o\delta}}}. \quad (4.11)$$

Егер желдеткіш сипаттамасы (3.20) теңдеумен сипатталатын болса, онда ауа шығыны мына өрнекпен анықталады

$$Q_{\epsilon} = \sqrt{\frac{A}{R_{o\delta} + C}}. \quad (4.12)$$

Егер желдеткіш сипаттамасын сипаттау үшін (3.19) түрдегі теңдеуді пайдалану ұсынылса, онда квадратты теңдеуді талдауға көшеміз, ал бұл есептердің шешілуін біршама күрделендіреді. Есептеулер практикасы (3.20) түрдегі теңдеумен желдеткіш сипаттамасын аппроксимациялау бірізділікті және басқа бірқатар желдету қосылыстарын талдаудың әбден қолайлы дәлдігін қамтамасыз етеді.

**13-мысал.**  $R_1 = 0,76$  даПа·с<sup>2</sup>/м<sup>6</sup>,  $R_2 = 0,47$  даПа·с<sup>2</sup>/м<sup>6</sup>,  $R_3 = 0,53$  даПа·с<sup>2</sup>/м<sup>6</sup>, үш бірізділікті қосылған құбыр жолының кедергісінен тұратын желдету тұғырында желдеткіш жұмыс істейді, ол 200 даПа. Депрессияны дамытады. Жүйеге ауаның қандай мөлшері енетінін анықтау керек.

Шешімі. Ауа жолының жалпы аэродинамикалық кедергісін табамыз

$$R_{o\delta} = 0,76 + 0,47 + 0,53 = 1,76 \text{ даПа·с}^2/\text{м}^6.$$

(4.11) формуланы пайдалана отырып, мынаны аламыз

$$Q_{\epsilon} = \sqrt{\frac{200}{1,76}} = 10,66 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Өйткені ауа жолдарының бірізділікті қосылысы кезінде ауаның жалпы мөлшері желдеткіш өнімділігіне теңеледі, онда берілген шартқа сәйкес жүйеге  $10,66 \text{ м}^3/\text{с}$  ауа келіп түседі.

**14-мысал.** Алдыңғы есептің шарты үшін желдеткіш жұмысының режимін және ауаның жалпы мөлшерін, егер оның сипаттамасы  $h_e = 342 - 0,25Q_e^2$  түрдегі теңдеумен сипатталатын болса, табу қажет.

Шешімі. Желдеткіштің берілісі және жүйеге келіп түсетін ауаның жалпы мөлшері мына формула бойынша анықталады (4.12).

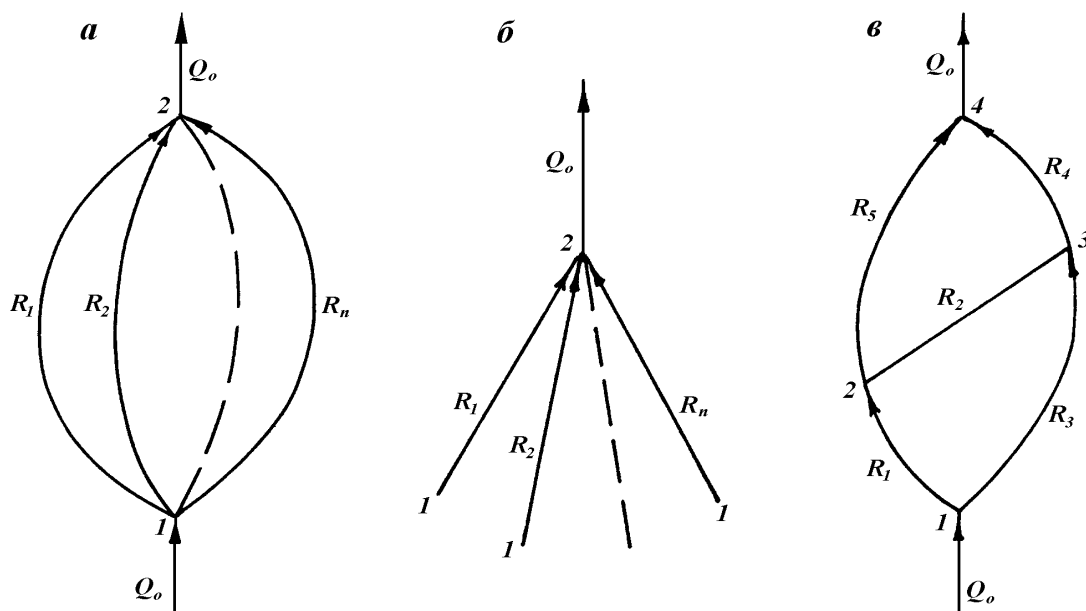
$$Q = Q_e = \sqrt{\frac{342}{1,76 + 0,25}} = 13,04 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Желдеткіш депрессиясын анықтау үшін есептер шартында берілген теңдеу сипаттамасы пайдаланылады. Желдеткіш өнімділігі кезінде  $Q_e = 13,04 \text{ м}^3/\text{с}$  болады

$$h_e = 342 - 0,25 \cdot 13,04^2 = 299,49 \text{ даПа}.$$

#### 4.1.5 Ауа жолдарын параллель қосу

Ауа жолдарын параллель қосу жабық (4.4, *а-сурет*) және ашық (4.4, *б-сурет*) типте болады. Ауаның жалпы мөлшері  $Q_o$  –ға тең параллель қосылысқа келіп түседі. Жеке тармақтар бойынша ауаны қалай бөлуді анықтау және параллель қосылыстағы  $R_{об}$  жалпы кедергіні табу талап етіледі.



4.4-сурет. Аэродинамикалық есептік желдету сұлбасы

Қойылған есепті шешуге кіріспес бұрын, параллель қосылыстың кейбір маңызды қасиеттеріне көңіл аударамыз.



1. Жалпы торапқа келіп түсетін және тораптан шығатын ауа мөлшерінің желісі тең болады

$$Q_o = Q_1 + Q_2 + Q_3 + \dots + Q_n. \quad (4.13)$$

2. Параллель қосылыстың  $h_o$  жалпы депрессиясы және оның барлық тармақтарының депрессиясы өзара тең:

$$h_o = h_1 = h_2 = h_3 = \dots = h_n. \quad (4.14)$$

Жеке тармақтардың депрессиясы және тұтас алғанда параллель қосылыстың депрессиясы 1 және 2 тораптардағы қысым айырымы ретінде анықталатынын назарға алса, оңай көз жеткізуге болады.

(4.14) өрнектегі депрессияны тармақтағы ауа шығыны мен кедергісінің мәндеріне айырбастап, мынаны аламыз

$$R_{o\bar{o}} Q_o^2 = R_1 Q_1^2 = R_2 Q_2^2 = R_3 Q_3^2 = \dots = R_{n-1} Q_{n-1}^2 + R_n Q_n^2.$$

Аталған жазу келесі теңдеу жүйесінде берілуі мүмкін:

$$\begin{cases} R_{o\bar{o}} Q_o^2 = R_1 Q_1^2 ; \\ R_{o\bar{o}} Q_o^2 = R_2 Q_2^2 ; \\ \dots \dots \dots \\ R_{o\bar{o}} Q_o^2 = R_{n-1} Q_{n-1}^2 ; \\ R_{o\bar{o}} Q_o^2 = R_n Q_n^2 . \end{cases}$$

Алынған жүйені келесі түрге түрлендіреміз:

$$\begin{cases} \frac{Q_1}{Q_o} = \sqrt{\frac{R_{o\bar{o}}}{R_1}} ; \\ \frac{Q_2}{Q_o} = \sqrt{\frac{R_{o\bar{o}}}{R_2}} ; \\ \dots \dots \dots \\ \frac{Q_n}{Q_o} = \sqrt{\frac{R_{o\bar{o}}}{R_n}} . \end{cases} \quad (4.15)$$

Сол және оң жақ бөліктерді жіктей отырып, аламыз

$$\frac{Q_1 + Q_2 + \dots + Q_n}{Q_o} = \sqrt{\frac{R_{o\delta}}{R_1}} + \sqrt{\frac{R_{o\delta}}{R_2}} + \dots + \sqrt{\frac{R_{o\delta}}{R_n}}.$$

Бұл жерде (4.13) назарға ала отырып, параллель қосылыстың жалпы аэродинамикалық кедергісін есептеу үшін есептік формуланы аламыз

$$\frac{1}{\sqrt{R_{o\delta}}} = \frac{1}{\sqrt{R_1}} + \frac{1}{\sqrt{R_2}} + \dots + \frac{1}{\sqrt{R_n}}. \quad (4.16)$$

Параллель қосылыстың жеке тармақтары бойынша ауа шығыны олардың депрессиясы теңдігінің принципіне байланысты анықталады. Мысалы, бірінші теңдеу жүйесінен (4.15) ұсынылады

$$Q_1 = Q_o \sqrt{\frac{R_{o\delta}}{R_1}}.$$

Осы жүйенің екінші теңдеуіне ұқсас аламыз

$$Q_2 = Q_o \sqrt{\frac{R_{o\delta}}{R_2}}.$$

Осылайша жалғастыра отырып, кез келген  $i$ -тармақтағы параллель қосылыс үшін ауа шығыны келесі формула бойынша анықталады:

$$Q_i = Q_o \sqrt{\frac{R_{o\delta}}{R_i}}, \quad (4.17)$$

мұнда  $i = 1, 2, 3, \dots, n$  – параллель қосылыс тармақтарын номерлеу;  
 $Q_o$  – параллель қосылыстың басына келіп түсетін ауа мөлшері.

**15-мысал.**  $R_1 = 0,35$  даПа·с<sup>2</sup>/м<sup>6</sup>,  $R_2 = 0,48$  даПа·с<sup>2</sup>/м<sup>6</sup>,  $R_3 = 0,62$  даПа·с<sup>2</sup>/м<sup>6</sup> кедергісінен тұратын үш ауа жолының параллель қосылуының басында (4.4, *a-сурет*) 36 м<sup>3</sup>/с ауа енеді. Желдету қосылысының жалпы кедергісі және депрессиясы, сондай-ақ ауаның қандай мөлшері ауа жолының әрқайсысына және олардың депрессиясына түсетінін анықтау талап етіледі.

Шешімі. (4.16) формуласы бойынша параллель қосылыстың жалпы кедергісі анықталады

$$\frac{1}{\sqrt{R_{o\delta}}} = \frac{1}{\sqrt{0,35}} + \frac{1}{\sqrt{0,48}} + \frac{1}{\sqrt{0,62}} = 4,40369.$$

Бұл жерден табамыз,  $R_{об} = 0,05157$  даПа·с<sup>2</sup>/м<sup>6</sup>.

(4.17) формуласына сәйкес ең бірінші ауа жолына мына мөлшердегі ауа түседі

$$Q_1 = 36 \cdot \sqrt{\frac{0,05157}{0,35}} = 13,82 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Екінші және үшінші ауа жолы түседі:

$$Q_2 = 36 \cdot \sqrt{\frac{0,05157}{0,48}} = 11,8 \text{ м}^3/\text{с};$$

$$Q_3 = 36 \cdot \sqrt{\frac{0,05157}{0,62}} = 10,38 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Есептің дұрыс шешілуін тексеру үшін желінің бірінші заңын пайдаланамыз. Біздің мысалымыз үшін келесі теңдік  $Q_0 - (Q_1 + Q_2 + Q_3) = 0$  орындалуы тиіс. Деректерді қоя отырып, аламыз  $36 - 13,82 - 11,8 - 10,38 = 0$ . Ауа шығыны дұрыс табылған. Желдету қосылысының жалпы депрессиясын табамыз

$$h_{об} = R_{об}Q_0^2 = 0,05157 \cdot 36^2 = 66,83 \text{ даПа}.$$

Ауа жолының депрессиясы:

$$h_1 = R_1Q_1^2 = 0,35 \cdot 13,82^2 = 66,84 \text{ даПа};$$

$$h_2 = R_2Q_2^2 = 0,48 \cdot 11,8^2 = 66,83 \text{ даПа};$$

$$h_3 = R_3Q_3^2 = 0,62 \cdot 10,38^2 = 66,80 \text{ даПа}.$$

Желдету қосылысын құрайтын жалпы депрессия және жекелеген ауа жолдарының депрессиясы өзара тең, кез келген параллель қосылыс үшін сипатты болып табылады.

**16-мысал.** Төрт ауа жолынан тұратын ашық типтегі параллель қосылысты білдіретін желдету желісінің тармақтары бойынша жалпы ауа шығынын және оның бөлінуін анықтау керек (4.4, *б-сурет*), егер бірінші тармаққа  $18 \text{ м}^3/\text{с}$  ауа келіп түскені белгілі болса. Тармақ кедергісі  $0,45; 0,56; 1,25; 0,82$  даПа·с<sup>2</sup>/м<sup>6</sup> –ға сәйкес тең.

Шешімі. Бірінші ауа жолының депрессиясын анықтаймыз

$$h_1 = R_1Q_1^2 = 0,45 \cdot 18^2 = 145,8 \text{ даПа}.$$

Параллель тармақтың депрессиясы өзара тең болса, онда

$$h_1 = h_2 = h_3 = h_4 = 145,8 \text{ даПа}.$$

Екінші ауа жолына келіп түсетін ауаның мөлшері  $h_2 = h_1$  шартында болады. Сондықтан,  $0,56 \cdot Q_2^2 = 145,8$ . Осы жерден табамыз

$$Q_2 = \sqrt{\frac{145,8}{0,56}} = 16,14 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Ауа шығыны қалған барлық тармақтар үшін осыған ұқсас анықталады. Тиісті есептеулерді орындай отырып, үшінші және төртінші тармаққа  $Q_3 = 10,8 \text{ м}^3/\text{с}$  и  $Q_4 = 13,3 \text{ м}^3/\text{с}$  мөлшердегі ауа түсетінін табамыз.

Жалпы ауа шығыны тең болады

$$Q_0 = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 = 18 + 16,14 + 10,8 + 13,3 = 58,24 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Өнеркәсіптік желдету желісін есептеу процесінде бірізділікті параллель қосылыстар типтес аралас сұлбалар кездесіп қалады. Мұндай есептерді шешу тәртібі (4.16) формуласы бойынша параллель тармақтардың әрбір жұбы үшін жалпы кедергіні табудан тұрады, ол есептеу сұлбасында параллель кедергіні айырбастаудан тұрады. Нәтижесінде бірізділікті қосылыс алынады, оның жалпы кедергісі (4.9) формуласы бойынша анықталады.

Осылайша, желдету қосылыстарының аралас сұлбасын талдау оларды кезең-кезеңмен түрлендіруге әкеледі және ең ақырында қарапайым бірізділікті қосылысқа әкеледі. Ауаның жалпы шығынын анықтау және желдету желісіндегі тармақтар бойынша ауаның бөлінуін анықтау жүргізілген түрлендіру тәртібіндегі қатынас бойынша кері анықталады.

**17-есеп.** Аралас типтегі желдету желісіне ауаны беру үшін (4.5, *a-сурет*) жұмыс доңғалағының 500 об/мин айналу жиілігі бар және қалақшаны орнату  $\theta = 30^\circ$  бұрышы бар ВЦ–32 желдеткіш орнатылған. Желдету қосылысының жалпы кедергісін, желдеткіштің жұмыс режимін және желдету желісінің тармақтары бойынша ауаның бөлінуін табу қажет. Есептік сұлбадағы тармақтар кедергісі даПа·с<sup>2</sup>/м<sup>6</sup> келесі сандық мәндерге ие болады:  $R_1 = 0,012$ ;  $R_2 = 0,08$ ;  $R_3 = 0,17$ ;  $R_4 = 0,32$ ;  $R_5 = 0,95$ ;  $R_6 = 0,056$ ;  $R_7 = 0,073$ ;  $R_8 = 0,021$ . ВЦ–32 желдеткіштің аэродинамикалық сипаттамасы 4.6-суретте келтірілген.

**Ш е ш і м і.** Қойылған есептердің шешімін келесі тәртіпте бастаймыз. (4.16) формуласы бойынша 3 пен 4 тораптар арасындағы параллель қосылыстың  $R_{об,1}$  жалпы кедергісін анықтаймыз

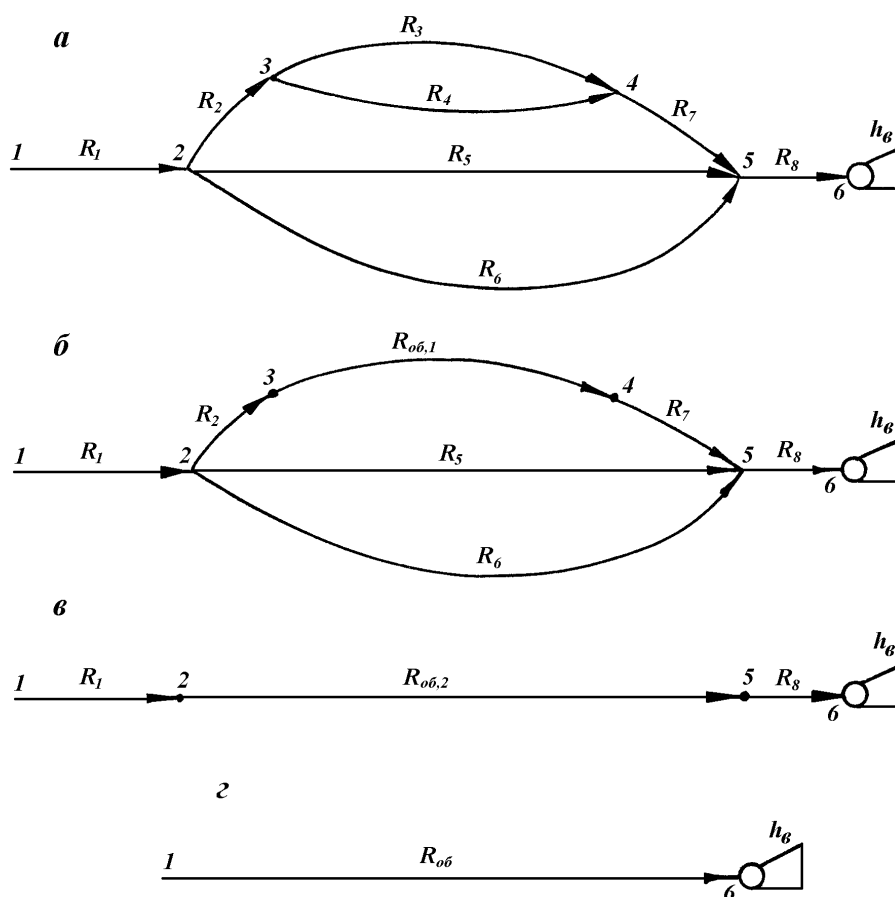
$$\frac{1}{\sqrt{R_{об,1}}} = \frac{1}{\sqrt{R_3}} + \frac{1}{\sqrt{R_4}} = \frac{1}{\sqrt{0,17}} + \frac{1}{\sqrt{0,32}} = 4,19312 ,$$

Осы жерде ұсынылады,  $R_{об,1} = 0,05688 \text{ даПа} \cdot \text{с}/\text{м}^6$ .

$R_3$  және  $R_4$  екі тармақтан тұратын 4.5, *a* –суреттегі параллель қосылыстың есептік сұлбасын оның  $R_{об,1}$  аналогына айырбастай отырып, бастапқы сұлбаға эквивалентті жаңа сұлбаны аламыз (4.5, *б-сурет*).

Алынған есептік сұлбадағы 2 – 3 – 4 – 5 тармақ бірізділікті қосылыс болып табылады, оның жалпы кедергісі (4.9) сәйкес тең болады

$$R_{2,3,5} = R_2 + R_{об,1} + R_7 = 0,08 + 0,05688 + 0,073 = 0,20988 \text{ даПа} \cdot \text{с}/\text{м}^6.$$



4.5-сурет. Ауа жолының аралас желдету қосылысын бірізділікті қосылысқа кезең-кезеңмен түрлендіру сұлбасы

Келесі қадам 2 және 5 торап арасындағы  $R_{06,2}$  параллель қосылыстың жалпы кедергісін анықтаумен байланысты

$$\frac{1}{\sqrt{R_{06,2}}} = \frac{1}{\sqrt{R_{2,3,5}}} + \frac{1}{\sqrt{R_5}} + \frac{1}{\sqrt{R_6}} = \frac{1}{\sqrt{0,20988}} + \frac{1}{\sqrt{0,95}} + \frac{1}{\sqrt{0,056}} = 7,43455,$$

осы жерде табамыз,  $R_{06,2} = 0,018092$  даПа·с/м<sup>6</sup>.

Параллель қосылысты  $R_{06,2}$  эквивалентті кедергіге айырбастағаннан кейін (4.5, б-сурет) үш тармақтан тұратын бірізділікті қосылысқа тасымалданады (4.5, в-сурет), оның жалпы кедергісі тең

$$R_{06} = R_1 + R_{06,2} + R_8 = 0,012 + 0,018092 + 0,021 = 0,0511 \text{ даПа·с/м}^6.$$

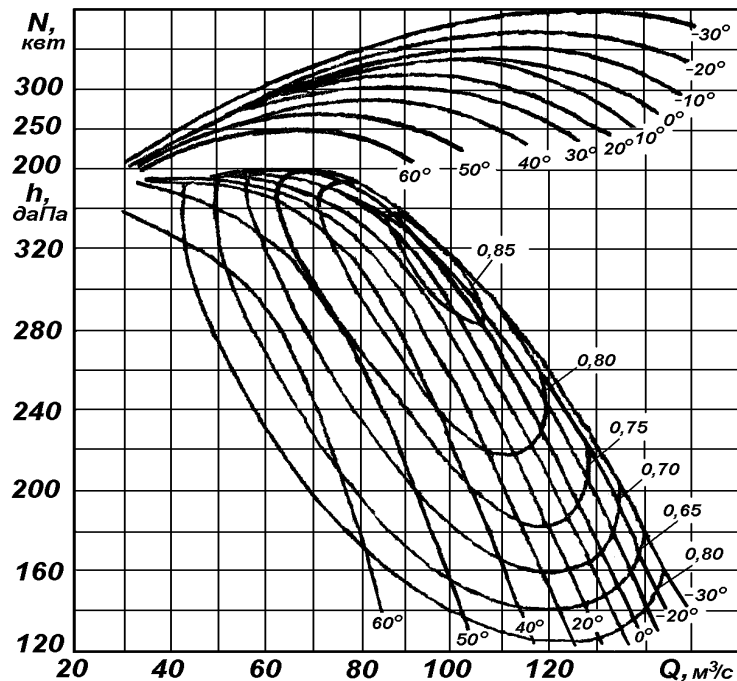
Жалпы кедергінің  $R_{06} = 0,0511$  даПа·с/м<sup>6</sup> табылған шамасы есептік сұлбаны оның ақырғы түріне түрлендіреді (4.5, г-сурет), ол қарастырылатын желдету қосылысына келіп түсетін  $Q$  ауаның жалпы мөлшерін анықтау үшін бастапқы болып табылады.

ВЦ-32 желдеткішпен дамидын депрессияның екінші заңына сәйкес жалпы кедергіні жеңуге шығындалады.

Сондықтан

$$h_6 = R_{06}Q^2 = 0,0511Q^2. \quad (4.18)$$

Аталған теңдеуді шешу үшін, желдеткіш сипаттамасының жұмыс бөлігін (3.20) түрдегі теңдеумен жуықтау қажет. Бұл үшін желдеткіш ВЦ-32 сипаттамасының (4.6-сурет) төменгі жұмыс тармағында берілген шарттар есебінен  $h_1 = 340$  даПа;  $Q_1 = 70$  м<sup>3</sup>/с және  $h_2 = 200$  даПа;  $Q_2 = 110$  м<sup>3</sup>/с координатасы бар екі нүктені таңдаймыз.



4.6-сурет. ВЦ-32 желдеткіш сипаттамасы  
( $n_1 = 500$  минутына жұмыс доңғалағының айналымы)

$A$  және  $C$  коэффициенттерін анықтау үшін теңдеудің келесі жүйесін құраймыз

$$\begin{cases} 340 = A + C \cdot 70^2; \\ 200 = A + C \cdot 110^2, \end{cases}$$

осыны шеше отырып, табамыз,  $A = 435$ ;  $C = -0,0194$ .

Осылайша, берілген учаскедегі желдеткіш сипаттамасы мына түрдегі теңдеумен сипатталады

$$h_e = 435 - 0,0194Q^2. \quad (4.19)$$

(4.19)-ны (4.18)-ға қойып, аламыз

$$435 - 0,0194Q^2 = 0,0511Q^2,$$

осы жерде желдету жүйесіне енетін ауаның жалпы шығынын анықтаймыз,  $Q = 78,5284$  м<sup>3</sup>/с-ға тең шаманы құраймыз.

Есептік сұлбадан (4.5, в-сурет) ұсынылады

$$Q = Q_1 = Q_8 = 78,5284 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Осылайша, 2 торапқа  $Q_1 = 78,5284$  м<sup>3</sup>/с ауа түседі. 2 және 5 тораптар арасындағы параллель қосылыстың тармақтары бойынша ауаның бөлінуі (4.17) формуласы бойынша анықталады.

$$Q_2 = Q_7 = Q_1 \sqrt{\frac{R_{об,2}}{R_{2,3,5}}} = 78,5284 \sqrt{\frac{0,018092}{0,20988}} = 23,056 \text{ м}^3/\text{с};$$

$$Q_5 = Q_1 \sqrt{\frac{R_{об,2}}{R_5}} = 78,5284 \sqrt{\frac{0,018092}{0,95}} = 10,837 \text{ м}^3/\text{с};$$

$$Q_6 = Q_1 \sqrt{\frac{R_{об,2}}{R_6}} = 78,5284 \sqrt{\frac{0,018092}{0,056}} = 44,6351 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Есептеуден белгілі, 3 торапқа  $Q_2 = 23,056 \text{ м}^3/\text{с}$  ауа түседі. 3 және 4 тораптар арасында параллель қосылыстың тармақтары бойынша ауаның аталған мөлшері келесі түрде бөлінетін болады.

$R_3$  тармаққа түседі

$$Q_3 = Q_2 \sqrt{\frac{R_{об,1}}{R_3}} = 23,056 \sqrt{\frac{0,05688}{0,17}} = 13,3336 \text{ м}^3/\text{с}.$$

$R_4$  тармаққа түседі

$$Q_4 = Q_2 \sqrt{\frac{R_{об,1}}{R_4}} = 23,056 \sqrt{\frac{0,05688}{0,32}} = 9,7205 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Есеп дұрыс шешілді деп көз жеткізу оңай. Бұл үшін барлық тораптар үшін желінің бірінші заңын және берілген есептік сұлбаның барлық тәуелсіз контурлары үшін екінші заңды орындауды тексеру қажет.

#### 4.1.6 Ауа жолының диагональ қосылысы

Диагональ желдету сұлбасы жер асты тәсілімен пайдалы қазбаларды өндіретін тау-кен кәсіпорындарына тән. Желдетудің диагональ сұлбасын талдау кезінде шешілуі тиісті негізгі мәселелер мыналар:

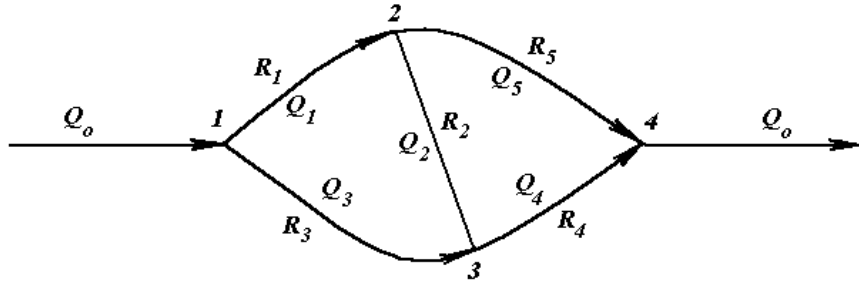
- ауа қозғалысының диагональ бағытын анықтау;
- есептік сұлбаның барлық тармақтары бойынша ауа шығынын анықтау;
- диагональ қосылыстың жалпы кедергісін анықтау.

Диагональ қосылыстың сипатты ерекшелігі 2-3 диагональға (4.4, в-сурет) ауа қозғалысы бағытын өзгерту немесе тармақтар кедергісінің ара қатынасына тәуелділіктегі оның қозғалысының болмауы мүмкіндігі болып табылады. Ауа қозғалысының диагональдағы жоғарыда аталған бағыттарының бірі мүмкін шартты зерттейміз.

Қарастырылатын желдету қосылысы торабындағы қысымды (4.7-сурет)  $P_1, P_2, P_3, P_4$  арқылы белгілейміз.

Егер ауа 2-нүктеден 3-нүктеге жылжытын болса, онды мына өрнек тура

$$P_2 > P_3. \quad (4.20)$$



4.7 –сурет. Диагональ қосылыстың есептік сұлбасы

Өз кезегінде

$$P_2 = P_1 - h_{1,2} \quad \text{и} \quad P_3 = P_1 - h_{1,3}, \quad (4.21)$$

мұнда  $h_{1,2}$  және  $h_{1,3}$  –1-2 және 1-3 тармақтағы депрессия.

(4.20) ара қатынасы (4.21) есебінен мына түрге түрленеді

$$h_{1,3} > h_{1,2}. \quad (4.22)$$

Басқаша, 2 және 3 нүктедегі қысым 4 тораптағы қысым және 2-4 мен 3-4 тармақтағы арын шығыны арқылы белгіленуі мүмкін

$$P_2 = P_4 + h_{2,4} \quad P_3 = P_4 + h_{3,4}. \quad (4.23)$$

Онда теңсіздік (4.20) мына түрде болады

$$h_{3,4} < h_{2,4}. \quad (4.24)$$

(4.22)-ны (4.24)-ға бөлеміз, тиісті тармақтарда ауа кедергісі мен шығыны арқылы депрессияны белгілей отырып, аламыз

$$\frac{R_3 Q_3^2}{R_4 Q_4^2} > \frac{R_1 Q_1^2}{R_5 Q_5^2}. \quad (4.25)$$

Өйткені  $Q_1 = Q_5 + Q_2$  и  $Q_4 = Q_3 + Q_2$ , онда (4.25) ара қатынасы мына түрге түрленеді

$$\frac{R_3}{R_4} \cdot \frac{1}{\left(1 + \frac{Q_2}{Q_3}\right)^2} > \frac{R_1}{R_5} \cdot \left(1 + \frac{Q_2}{Q_5}\right)^2. \quad (4.26)$$



Өйткені жақша ішінде тұрған өрнек бірліктен үлкен, онда оларды шегіндіру (4.26) теңсіздікті күшейтеді. Сондықтан, 2 нүктесінен 3 нүктеге ауа қозғалысының шарты орындалады, егер

$$\frac{R_1}{R_5} < \frac{R_3}{R_4}. \quad (4.27)$$

Осыған ұқсас талқылай отырып, келесі ара қатыстарды алуға болады:

$$\frac{R_1}{R_5} > \frac{R_3}{R_4}, \quad (4.28)$$

ол 3-нүктеден 2- нүктеге диагональ бойынша ауа ағыны қозғалысының шартын анықтайды.

Ауа қозғалысының диагональда болмауында теңдік тура

$$P_2 = P_3,$$

осы жерде, (4.21) және (4.23) назарға ала отырып, келесі теңдікке көшеміз:

$$\frac{R_3 Q_3^2}{R_4 Q_4^2} = \frac{R_1 Q_1^2}{R_5 Q_5^2}. \quad (4.29)$$

Өйткені  $Q_2 = 0$ , онда  $Q_1 = Q_5$  және  $Q_3 = Q_4$  тура жорамал дұрыс болар еді. Бұл жағдайда (4.29) –дан ұсынылады

$$\frac{R_1}{R_5} = \frac{R_3}{R_4}. \quad (4.30)$$

Осылайша, ауа қозғалысын диагональда шартын орындау кезінде (4.30) болмайды.

(4.27), (4.28) және (4.30) өрнектерін салыстыра отырып, диагональдағы ауа қозғалысының бағыты параллель тармақтар кедергінің қатынасына тәуелді және диагональдың өзінің кедергісіне байланысты емес.

Шахта желдету желісінде диагональ элементтердің болуы, ондағы ауаның қозғалысы өз шамасы мен бағытын өзгерте алады, белгілі бір қауіптілікті білдіреді, желдету ағындарының газдалған себебі болуы мүмкін. Себебі ауа ағыстарының аударылып түсу ықтималдығы тым үлкен, (4.30) өрнекке кедергі қатынасына жақын.

Диагональ желіде ауаны бөлу есебін шешу желінің бірінші және екінші заңдарын негізінде жүзеге асырылады. Есептік сұлбада (4.7-сурет) диагональдағы ауа 2-нүктеден 3-нүктеге жылжиды деп болжап, желінің бірінші заңын пайдалана отырып, 1, 2 және 3 тораптар үшін ауа шығынының балансын құраймыз.

$$\begin{cases} Q_o = Q_1 + Q_3; \\ Q_1 = Q_2 + Q_5; \\ Q_4 = Q_2 + Q_3. \end{cases}$$

Бірінші теңдеуде  $Q_1$  орнына  $Q_2$  және  $Q_5$  шығындары арқылы берілген оның мәндерін қоя отырып, теңдеудің келесі жүйесін аламыз:

$$\begin{cases} Q_o = Q_2 + Q_3 + Q_5; \\ Q_1 = Q_2 + Q_5; \\ Q_4 = Q_2 + Q_3, \end{cases} \quad (4.31)$$

осы жерде,  $Q_2$ ,  $Q_3$  және  $Q_5$  тәуелсіз шығындар болып табылады, оларды пайдалана отырып берілген есептік сұлба үшін ауаның қалған барлық шығындарын есептеуге болады.

Желінің екінші заңына сәйкес берілген есептік сұлбаның 1-2-3-1 және 2-4-3-2 контурлары үшін (4.7-сурет) теңдеудің келесі жүйесін құруға болады:

$$\begin{cases} R_3 Q_3^2 - R_2 Q_2^2 - R_1 Q_1^2 = 0; \\ R_2 Q_2^2 + R_4 Q_4^2 - R_5 Q_5^2 = 0. \end{cases} \quad (4.32)$$

$Q_1$  және  $Q_4$  орнына (4.31)-дан олардың мәндерін қойғаннан кейін (4.32) жүйесі мына түрде болады

$$\begin{cases} R_3 Q_3^2 - R_2 Q_2^2 - R_1 (Q_2 + Q_5)^2 = 0; \\ R_2 Q_2^2 + R_4 (Q_2 + Q_3)^2 - R_5 Q_5^2 = 0. \end{cases} \quad (4.33)$$

(4.18) жүйесінде теңдеулердің әрқайсысын  $Q_2$  –ға мүшелеп бөліп және белгілеп

$$\frac{Q_3}{Q_2} = x \quad \text{және} \quad \frac{Q_5}{Q_2} = y, \quad (4.34)$$

теңдеулердің келесі жүйесіне көшеміз:

$$\begin{cases} R_3 x^2 = R_2 + R_1 (1 + y)^2; \\ R_5 y^2 = R_2 + R_4 (1 + x)^2, \end{cases}$$

осы жерде табамыз

$$\begin{cases} x = \sqrt{\frac{R_2}{R_3} + \frac{R_1}{R_3} (y+1)^2}; \\ y = \sqrt{\frac{R_2}{R_5} + \frac{R_4}{R_5} (x+1)^2}. \end{cases} \quad (4.35)$$

Аталған жүйені шешу жалпы түрде болады, алайда ол тым күрделі және аз қолданылады. Сондықтан түбірлерді анықтау үшін бәрінен бұрын квадраттық теңдеулер жүйесін сызықтау әдісі, графикалық әдіс немесе бірізділікті жуықтау әдісі пайдаланылады.

А. С. Попов ұсынған сызықтау әдістерінің бірі жуықтау формулаларының көмегімен квадраттық теңдеулерді сызықтау теңдеуіне ауыстыруға негізделген. Егер екі рационалды сан болса, мысалы  $A > B$  сияқты, онда 4 %-дан аспайтын қателікпен:

$$\sqrt{A^2 + B^2} = 0,96 \cdot A + 0,4 \cdot B. \quad (4.36)$$

Теңдеулер жүйесін (4.35) келесі түрге келтіреміз:

$$\begin{cases} x = \sqrt{\left(\sqrt{\frac{R_2}{R_3}}\right)^2 + \left[\sqrt{\frac{R_1}{R_3}}(y+1)\right]^2}; \\ y = \sqrt{\left(\sqrt{\frac{R_2}{R_5}}\right)^2 + \left[\sqrt{\frac{R_4}{R_5}}(x+1)\right]^2}. \end{cases}$$

Түбір астындағы қосындының бірінші мүшесінің квадраты екінші мүше квадратынан үлкен деп жорамалдай отырып (4.36.), аламыз

$$\begin{cases} x = 0,96 \sqrt{\frac{R_2}{R_3}} + 0,4 \sqrt{\frac{R_1}{R_3}} (y+1); \\ y = 0,96 \sqrt{\frac{R_2}{R_5}} + 0,4 \sqrt{\frac{R_4}{R_5}} (x+1). \end{cases} \quad (4.37)$$

Алынған жүйе  $x$  және  $y$  белгісіздерге салыстырмалы оңай шешіледі.

Графикалық шешім гиперболаның қиылысу нүктелері координатасын іздеуден тұрады (4.35).

Бірізділікті жуықтау әдісін пайдаланған кезде мынадай.  $y = 0$  деп қабылданады және жүйенің (4.35) бірінші теңдеуінен  $x_1$  үшін бірінші жуықтау есептеледі. Жүйенің екінші теңдеуіне  $x_1$  қойып (4.35),  $y_1$  үшін бірінші

жуықтауды табамыз. Жүйенің (4.35) бірінші теңдеуіне  $y_1$  қойып,  $x_2$  үшін екінші жуықтауды табамыз. Есептеу екі бірізділікті  $x$  және  $y$  мәндері арасындағы қажетті ұқсастықты алуға дейін жалғаса береді.

Ізделетін теңдеудің  $x$  және  $y$  түбірлерін анықтағаннан кейін қарапайым диагональ қосылыс тармағындағы ауа шығыны (4.34) есебінен және жүйенің бірінші теңдеуі (4.31) мына формулалар бойынша анықталады:

$$Q_2 = \frac{Q_o}{x + y + 1}; \quad (4.38)$$

$$Q_3 = \frac{xQ_o}{x + y + 1}; \quad (4.39)$$

$$Q_5 = \frac{yQ_o}{x + y + 1}. \quad (4.40)$$

$R_\partial$  желдетудің қарастырылатын диагональ сұлбасының жалпы кедергісі мына өрнектен табылады

$$R_\partial = \frac{h_\partial}{Q_o^2}, \quad (4.41)$$

мұнда  $h_\partial = R_3 Q_3^2 + R_4 Q_4^2$  – диагональ қосылыстың жалпы депрессиясы.

$Q_4 = Q_2 + Q_3$  біліп және (4.38) мен (4.39) назарға алып, оларды (4.41)-ға қойғаннан кейін және осыған ұқсас келтіргеннен кейін қарапайым диагональ қосылыстың кедергісін анықтау үшін есептік формуланы аламыз

$$R_\partial = \frac{R_3 x^2 + R_4 (1 + x)^2}{(x + y + 1)^2}. \quad (4.42)$$

Желдетудің күрделі көп диагональ сұлбасын шешу есептеудің арнайы әдістерінің көмегімен жүзеге асырылады, күрделі желдету қосылыстары үшін тән.

**18-мысал.** Диагональ қосылыстың басында (4.7-сурет)  $64 \text{ м}^3/\text{с}$  ауа түседі. Желдету қосылыстарының тармақтары бойынша ауаны бөлу қалай анықталатыны талап етіледі, егер тармақтағы  $\text{даПа} \cdot \text{с}^2/\text{м}^6$  аэродинамикалық кедергі мынаған тең:  $R_1 = 0,05$ ;  $R_2 = 0,06$ ;  $R_3 = 0,045$ ;  $R_4 = 0,02$ ;  $R_5 = 0,3$ .

**Ш е ш і м і.** Диагональдағы ауа қозғалысының бағытын анықтаймыз. Бұл үшін келесі қатынастарды табамыз:  $R_1 / R_5 = 0,05 / 0,3 = 0,1666$ ;  $R_3 / R_4 = 0,045 / 0,02 = 2,25$ .

Есептеулерден белгілі,  $R_1/R_5 < R_3/R_4$ . Сондықтан, кедергілердің берілген ара қатыстары кезінде диагональда ауа ағынының бағыты 2-тораптан 3-торапқа қарай өтетін болады.

(4.35)-ға аэродинамикалық кедергілердің орнына олардың сандық мәндерін қойып, аламыз

$$\begin{cases} x = \sqrt{1,3333 + 1,1111(1 + y)^2}; \\ y = \sqrt{0,2 + 0,06667(1 + x)^2}. \end{cases} \quad (4.43)$$

Берілген жүйені шешу үшін бірізділікті жуықтау әдісін пайдаланамыз. Есептеу процедурасы келесі тәртіпте орындалады.

**Б і р і н ш і қ а д а м.** Жүйенің бірінші теңдеуінен  $y = 0$  (4.43) деп алып,  $x_1 = \sqrt{2,4444} = 1,563$  табамыз. Жүйенің екінші теңдеуіне  $x_1$  мәнін қоя отырып (4.43),  $y_1$  үшін бірінші жуықтауды аламыз.

$$y_1 = \sqrt{0,2 + 0,06667(1 + 1,563)^2} = 0,799.$$

**Е к і н ш і қ а д а м.** Жүйенің бірінші теңдеуіне (4.43)  $y_1$  табылған мәндерін қойып,  $x_2$  үшін екінші жуықтауды аламыз.

$$x_2 = \sqrt{1,3333 + 1,1111(1 + 0,799)^2} = 2,220.$$

(4.43) екінші теңдеуден  $x_2$  белгісіз кезінде  $y_2$  үшін екінші жуықтауды аламыз.

$$y_2 = \sqrt{0,2 + 0,06667(1 + 2,220)^2} = 0,944.$$

**Ү ш і н ш і қ а д а м.**  $y_2 = 0,944$  кезінде  $x_3$  деп есептейміз.

$$x_3 = \sqrt{1,3333 + 1,1111(1 + 0,944)^2} = 2,352.$$

Жүйенің екінші теңдеуінен (4.43) ұсынылады

$$y_3 = \sqrt{0,2 + 0,06667(1 + 2,352)^2} = 0,974.$$

Баяндалған алгоритм бойынша есептеуді жалғастыра отырып, алтыншы қадамда анықталатын шамалар үшін келесі мәндерді  $x_6 = 2,387$ ;  $y_6 = 0,982$  аламыз. Әрі қарайғы есептеу мынаны көрсетеді, есептеулердің берілген дәлдігі кезінде  $x$  үшін сандық мәндер қайталанатын болады. Түпкілікті деп қабылдаймыз,  $x = 2,387$  және  $y = 0,982$ .

$Q_2$  анықтау үшін (4.38) формуланы пайдаланамыз.  $Q_0$  орнына олардың  $x$  және  $y$  мәндерін қойып, мынаны аламыз

$$Q_2 = \frac{64}{2,387 + 0,982 + 1} = 14,65 \text{ м}^3/\text{с}.$$

(4.34)-дан ұсынылады,  $Q_3 = x \cdot Q_2 = 2,387 Q_2$  және  $Q_5 = y \cdot Q_2 = 0,982 Q_2$ . Тиісті деректерді қойып, мынаны аламыз

$$Q_3 = 2,387Q_2 = 2,387 \cdot 14,65 = 34,97 \text{ м}^3/\text{с};$$

$$Q_5 = 0,982Q_2 = 0,982 \cdot 14,65 = 14,38 \text{ м}^3/\text{с}.$$

1-2 және 3-4 тармақтағы ауа шығынын табамыз, (4.31) шарттан пайдаланамыз.

$$Q_1 = Q_2 + Q_5 = 14,65 + 14,38 = 29,03 \text{ м}^3/\text{с};$$

$$Q_4 = Q_2 + Q_3 = 14,65 + 34,97 = 49,62 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Есептің дұрыс шешілгеніне көз жеткізу үшін желдету желісінің бірінші және екінші заңдарының алынған нәтижесіне сәйкес келетінін тексеру жеткілікті.

#### 4.1.7 Күрделі желдету қосылыстарын есептеу

Күрделі желдету сұлбасын есептеу негізіне (4.6) түрдегі теңдеу жүйесі салынған, оны шешу қазіргі есептеу техникасын тарта отырып, арнайы программалар бойынша жуықталған, итерацияланған, есептеу алгоритмдерінің көмегімен жүзеге асырылады. Осы кластағы есептерді шешудің итерацияланған әдістерінің кейбір нұсқаларын қарастырамыз.

А н д р и я ш е в – К р о с с әдісі. Есептік аэродинамикалық сұлбаның барлық тораптары үшін бірінші заң бойынша ауа шығынының  $Q_{i,1}$  жуық мәні белгілі болсын. Өйткені ауа шығынының жуық мәндері шынайы мәндерден ерекшеленеді, тиісті контурда депрессияның алшақтығы байқалады, келесі тәуелділіктер бойынша ауаның қабылданған шығындарына енгізілген түзетулерді анықтауға болады:

$$\Delta Q_j = - \frac{\sum_{i=1}^n \varepsilon \cdot R_i Q_{i,1}^2 + h_{\varepsilon,j}}{2 \cdot \sum_{i=1}^n \left[ |R_{i,1} Q_{i,1}| + \left| \frac{dh_{\varepsilon,j}}{dQ} \right| \right]}, \quad (4.44)$$

мұнда  $\Delta Q_j$  –  $j$ -лі тұйық контур үшін бірыңғай түзету шығыны;

$\varepsilon$  – бағыт коэффициенті +1-ге тең, егер контурды айналдыру ауа ағынының бағытына сәйкес келсе, –1 егер сәйкес келмесе;

$n$  – контурдағы тармақ саны;

$h_{\varepsilon,j}$  –  $j$ -лі контурға енетін тартым көздерінің депрессиясы.

Бөлшектегі өрнек  $j$ -лі контурдағы депрессияның алшақтығы болып табылады

$$\Delta h_j = \sum_{i=1}^n \varepsilon \cdot R_i Q_{i,1}^2 + h_{\varepsilon,j}, \quad (4.45)$$

ол бастапқы ауа шығындарының жуықтау мәндері күшінде пайда болады.

Егер  $\Delta h_j > 0$  болса, онда тармақтар үшін ауа шығыны контурды айналдыру бағытымен сәйкес келеді, түзетілген шығын тең болады

$$Q_i = Q_{i,1} - |\Delta Q_j|, \quad (4.46)$$

Егер сәйкес келмесе, онда

$$Q_i = Q_{i,1} + |\Delta Q_j|. \quad (4.47)$$

$\Delta h_j < 0$  жағдай үшін кері көрініске тап боламыз.

Түзетілген  $Q_i$  мәндер табылғаннан кейін  $\Delta h_j$  контур бойынша депрессия алшақтығы анықталады. Егер олар мүмкін шамадан асатын болса, онда есептеу процесі итерацияланған процестің кейбір қадамында қажетті дәлдікке жетпейінше жалғаса береді.

Есептеу алгоритмі келесі тәртіпте орындалады.

1. Желінің бірінші заңы бойынша есептеу сұлбасында ауаның бастапқы бөлінуі беріледі.

2. (4.45) формуласы бойынша есептеу сұлбасының барлық тәуелсіз контурлары үшін депрессия алшақтығын есептейді.

3. (4.44) формуласы бойынша әрбір тәуелсіз контур үшін  $\Delta Q_{j,1}$  түзетулер анықталады.

4. (4.46) және (4.47) формулалары бойынша есептеу сұлбасының  $Q_{j,1}$  барлық тармақтары үшін ауаның жұмсалуды бастапқы жуықтау анықталады.

5.  $E_Q$  есептеудің берілген дәлдігі бар  $\Delta Q_{j,1max}$  максимум түзетулердің абсолютті мәндері салыстырылады.

6. Егер  $|\Delta Q_{j,1max}| > E_Q$  болса, онда табылған түзетулер есебінен  $\Delta Q_{j,2}$  жаңа түзетулер есептеледі, есептеу сұлбасының барлық тармақтары үшін  $Q_{j,2}$  жаңа шығындар анықталады.

7. Есептеу  $|\Delta Q_{j,1max}| < E_Q$  шартын орындау кезінде тоқтатылады.

Итерацияланған процесс Андрияшев – Кросс әдісі бойынша әрдайым сәйкес келмейді. Қанағаттанарлық ұқсастық, егер контурларды есептеу үшін тандап алынған тармақтардағы қысым шығынының қосындысы тәуелсіз тармақтағы қысым шығындары қосындысынан елеулі аз болғанда қол жеткізіледі.

**Н ь ю т о н ә д і с і.** Берілген есептік аэродинамикалық сұлба үшін ауаның  $Q_{i,1}$  жуықтау шығындары қабылданады, барлық тораптар үшін желінің бірінші заңы бойынша барлық тармақтармен байланыстырады.

(4.45) формуласы бойынша есептеу сұлбасының барлық контурлары үшін  $\Delta h_j$  депрессиясының алшақтығы есептеледі.

Егер желіде тартым көздері болмаған жағдайда желдету желісіне келіп түсетін ауаның кейбір мөлшерін табиғи бөлу үшін есеп шешілетін болса, онда

$\Delta Q_i$ ,  $i = \overline{1, n}$  қабылданған шығындарға еркін енгізілген түзетулерді есептеу үшін келесі сызықтық жүйе құрастырылады

$$\begin{cases} \sum_{S=1}^N \Delta Q_i = 0; \\ \sum_{j=1}^K 2R_i Q_{i,1} \Delta Q_i + \Delta h_j = 0, \end{cases} \quad (4.48)$$

мұнда  $S = 1, 2, \dots, N$  – есептеу сұлбасындағы тораптарды номерлеу;

$j = 1, 2, \dots, K$  – есептеу сұлбасындағы тәуелсіз контурларды есептеу;

$i = 1, 2, \dots, n$  – есептеу сұлбасындағы тармақтарды номерлеу.

(4.48) тартым көздері бар болған кезде теңдеу жүйесіне желдеткіш сипаттамасының жұмыс учаскесін жуықтайтын (3.19) немесе (3.20) түрдегі тәуелділікті ескеретін қосымша қосылғыш енгізіледі.

Егер желдеткіштің жұмыс сипаттамасы  $h_e = A + BQ + CQ_e^2$  тәуелділікпен жазылса, онда теңдеулер жүйесі түзетулерді анықтау үшін еркін қабылданған шығындар мына түрді қабылдайды

$$\begin{cases} \sum_{S=1}^N \Delta Q_{i,1} = 0; \\ \sum_{J=1}^K 2R_i Q_{i,1} \Delta Q_i - (B + 2CQ_e) \Delta Q_e + \Delta h_j = 0. \end{cases} \quad (4.49)$$

Екі мүшелі  $h_e = A + CQ_e^2$  жуықтайтын тәуелділік шарты үшін теңдеулер жүйесі түзетулерді есептеу үшін мына түрде жазылады:

$$\begin{cases} \sum_{S=1}^N \Delta Q_i = 0; \\ \sum_{J=1}^K 2R_i Q_{i,1} \Delta Q_i - 2CQ_{i,1} \Delta Q_i + \Delta h_e = 0. \end{cases} \quad (4.50)$$

$\Delta Q_i$  анықтағаннан кейін есептеу сұлбасының барлық тармақтары бойынша ауа шығынының мәндері түзетіледі

$$Q_i = Q_{i,1} + \Delta Q_i. \quad (4.51)$$

Қайтадан табылған мәндер үшін  $Q_i$  (4.45)-ға сәйкес контур бойынша депрессия алшақтығы тексеріледі. Егер олар мүмкін нормадан асып кетсе, есептеу процесі  $k$ -м және  $(k + 1)$ -жуықтаулар арасындағы айырмашылық берілген дәлдікке сәйкес келмейінше қайталана беріледі.



Ньютон әдісі бойынша есепті шешу кезінде есептеу алгоритмі келесі тәртіпте жүргізіледі.

1. Есептеу сұлбасының барлық тармақтары үшін бірінші заң бойынша байланыстыра отырып  $Q_{i,1}$  ауаны бастапқы бөлу беріледі.

2. Желінің екінші заңы бойынша барлық тәуелсіз контурлар үшін  $\Delta h_j$  депрессия алшақтығы есептеледі.

3. Ауаның қабылданған шығындарына енгізілген түзетулерді есептеу үшін тартым көздерінің болуы немесе болмауына байланысты (4.48), (4.49), (4.50) түрдегі теңдеулер жүйесі қалыптасады.

5. Ауаның қабылданған шығындарына енгізілген  $\Delta Q_i$  алғашқы түзетулер анықталады.

6. (4.51) формуласы бойынша қабылданған ауаның жуықтау шығындары түзетіледі.

7. Ауа шығындарының түзетілген мәндері үшін есептеудің берілген дәлдігіндегі депрессия алшақтығының абсолютті мәндерінің барлық контурлары үшін сәйкес тексеріледі. Егер шарт орындалмаса, онда есептеудің қажетті дәлдігіне жеткенге дейін есептеу жалғаса береді.

Тұтастай қанағаттанарлық ұқсастыққа ие бола отырып, Ньютон бойынша сызықтау әдісі сол кезде маңызды кемшіліктерге ие болады. Итерацияланған процестегі ұқсастық жылдамдығы маңызды шамада ауа шығындарының бірінші жуықтау тапсырмасын берген дәлдікке байланысты. Ауаның шынайы бөлінуіне  $Q_{i,1}$  ең бірінші жуықтау тым жақын берілген сайын, есептеу процесі жылдам өтеді. Алайда шахта желілері үшін бұл шартты үлкен өлшемділікте орындау айрықша қиыншылықты тудырады. Сондықтан  $Q_{i,1}$  жуықталған мәндер ретінде практикада шахта бойынша ауаны нақты өлшеу, ал жобалау кезінде – есептеу сұлбасының жекелеген тармақтары бойынша оның мөлшерін тұтыну ұсынылады.

**19-мысал.** 4.8, *a*-суретте берілген желдетудің есептеу сұлбасы үшін, егер берілген желдету желісінде желдеткішті орнату ұсынылса, ауаны табиғи нақты бөлуді табу талап етіледі, оның аэродинамикалық сипаттамасы  $h_e = 380 - 0,12Q_e^2$  түрдегі теңдеумен сипатталады. Есептеу сұлбасы тармақтардағы аэродинамикалық кедергі даПа·с<sup>2</sup>/м<sup>6</sup> келесі мәндерді құрайды:  $R_{1,2} = 0,02$ ;  $R_{2,3} = 0,02$ ;  $R_{2,4} = 0,15$ ;  $R_{3,4} = 0,05$ ;  $R_{3,5} = 0,09$ ;  $R_{4,5} = 0,06$ .

Шешімі. Диагональдағы ауа қозғалысының бағытын тексереміз. Бұл үшін тармақтар кедергісінің қатынасын табамыз

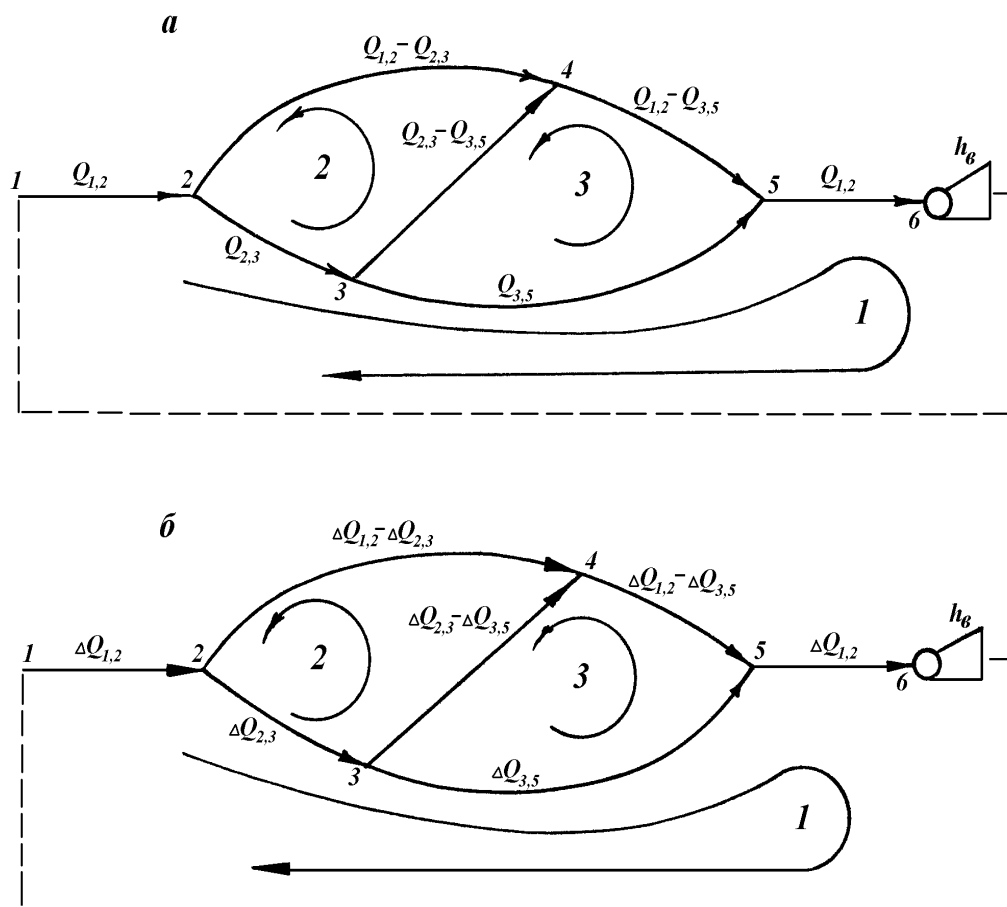
$$\frac{R_{2,4}}{R_{4,5}} = \frac{0,15}{0,06} = 2,5 \quad \text{и} \quad \frac{R_{2,3}}{R_{3,5}} = \frac{0,02}{0,09} = 0,22.$$

Өйткені  $R_{2,4}/R_{4,5} > R_{2,3}/R_{3,5}$  болса, онда ауа ағыны 3-нүктеден 4-нүктеге жылжитын болады, ал бұл сұлбадағы берілген бағытқа сәйкес келеді. Желдетудің есептеу сұлбасы үш тәуелсіз контурды қамтиды, олардың әрқайсысын айналып өту бағыты стрелкамен көрсетілген.

Тәуелсіз шығындар үшін  $Q_{1,2}$ ,  $Q_{2,3}$  және  $Q_{3,5}$  ауа ағындарын қабылдаймыз. Ауаның қалған барлық шығындары тәуелсіздіктер арқылы анықталады. Олардың бірінші заңы

бойынша байланыс 4.8, *a*-суретте көрсетілген. Бірінші жуықтау ретінде тәуелсіз шығындар үшін келесі сандық мәндерді қабылдаймыз:  $Q_{1,2} = 45 \text{ м}^3/\text{с}$ ;  $Q_{2,3} = 35 \text{ м}^3/\text{с}$ ;  $Q_{3,5} = 25 \text{ м}^3/\text{с}$ .

Келесі қадам әрбір контур бойынша депрессия алшақтығын есептеумен байланысты, бұл үшін желінің екінші заңын пайдаланады. Есептеуді, егер контур бойынша депрессия алшақтығы  $|\Delta h| \leq 0,1$  даПа шамадан аспайтын болса, ақырғы деп санаймыз.



4.8-сурет. Үш контурлы желдетудің есептеу сұлбасы

Желінің екінші заңы негізінде теңдеулер жүйесін құру кезінде депрессия алшақтығын және ауа шығындарына түзетулерді анықтау үшін келесі ережелерді басшылыққа алу ұсынылады. Егер тармақтағы ауа ағының бағыты контур айналдыру бағытымен сәйкес келсе, онда қосылғыш «плюс» белгісімен алынады, егер сәйкес келмесе, «минус» белгісімен алынады. Егер контурды айналдыру бағыты желдеткішпен ауа беру бағытымен сәйкес келсе, онда оның депрессиясы «минус» белгісімен, егер сәйкес келмесе, онда «плюс» белгісімен алынады.

$Q_6 = Q_{1,2}$  назарға ала отырып бірінші, екінші және үшінші контурлар үшін депрессия алшақтығын есептейміз.

$$\Delta h_1 = R_{1,2} Q_{1,2}^2 + R_{2,3} Q_{2,3}^2 + R_{3,5} Q_{3,5}^2 - (380 - 0,12 Q_6^2) = 0,02 \cdot 45^2 + 0,02 \cdot 35^2 + 0,09 \cdot 25^2 - 380 + 0,12 \cdot 45^2 = -15,75 \text{ даПа};$$

$$\Delta h_2 = R_{2,3} Q_{2,3}^2 + R_{3,4} (Q_{2,3} - Q_{3,5})^2 - R_{2,4} (Q_{1,2} - Q_{2,3})^2 = 0,02 \cdot 35^2 + 0,05 \cdot 10^2 - 0,15 \cdot 10^2 = 14,5 \text{ даПа};$$

$$\Delta h_3 = R_{3,5} Q_{3,5}^2 - R_{4,5} (Q_{1,2} - Q_{3,5})^2 - R_{3,4} (Q_{2,3} - Q_{3,5})^2 = 0,09 \cdot 25^2 - 0,06 \cdot 20^2 - 0,05 \cdot 10^2 = 27,25 \text{ даПа}.$$

$\Delta Q_{1,2}$ ,  $\Delta Q_{2,3}$  және  $\Delta Q_{3,5}$  ауаның қабылданған шығындарына түзетулер енгіземіз, желінің бірінші заңы бойынша олардың байланысы 4.4, б-суретте берілген. Өйткені есептің шарты бойынша желдеткіштің жұмыс сипаттамасы екі мүшелі тәуелділікпен сипатталады, онда түзетулерді есептеу үшін (4.50) түрдегі теңдеулер жүйесін пайдаланамыз.

$$\begin{cases} 2R_{1,2}Q_{1,2}\Delta Q_{1,2} + 2R_{2,3}Q_{2,3}\Delta Q_{2,3} + 2R_{3,5}Q_{3,5}\Delta Q_{3,5} - 2CQ_{1,2}\Delta Q_{1,2} + \Delta h_1 = 0; \\ 2R_{2,3}Q_{2,3}\Delta Q_{2,3} + 2R_{3,4}(Q_{2,3} - Q_{3,5})(\Delta Q_{2,3} - \Delta Q_{3,5}) - \\ - 2R_{2,4}(Q_{1,2} - Q_{2,3})(\Delta Q_{1,2} - \Delta Q_{2,3}) + \Delta h_2 = 0; \\ 2R_{3,5}Q_{3,5}\Delta Q_{3,5} - 2R_{4,5}(Q_{1,2} - Q_{3,5})(\Delta Q_{1,2} - \Delta Q_{3,5}) - \\ - 2R_{3,4}(Q_{2,3} - Q_{3,5})(\Delta Q_{2,3} - \Delta Q_{3,5}) + \Delta h_3 = 0. \end{cases}$$

Тармақтар кедергісіне сандық мәндерді қойғаннан кейін қабылданған ауа шығындарының жуық мәндері, теңдеулер жүйесі келесі түрге түрленеді:

$$\begin{cases} 2 \cdot 0,02 \cdot 45 \cdot \Delta Q_{1,2} + 2 \cdot 0,02 \cdot 35 \cdot \Delta Q_{2,3} + 2 \cdot 0,09 \cdot 25 \cdot \Delta Q_{3,5} + \\ + 2 \cdot 0,12 \cdot 45 \cdot \Delta Q_{1,2} - 15,75 = 0; \\ 2 \cdot 0,02 \cdot 35 \cdot \Delta Q_{2,3} + 2 \cdot 0,05 \cdot (35 - 25) (\Delta Q_{2,3} - \Delta Q_{3,5}) - \\ - 2 \cdot 0,15 \cdot (45 - 35) (\Delta Q_{1,2} - \Delta Q_{2,3}) + 14,5 = 0; \\ 2 \cdot 0,09 \cdot 25 \cdot \Delta Q_{3,5} - 2 \cdot 0,06 \cdot (45 - 25) (\Delta Q_{1,2} - \Delta Q_{3,5}) - \\ - 2 \cdot 0,05 \cdot (35 - 25) (\Delta Q_{2,3} - \Delta Q_{3,5}) + 27,25 = 0. \end{cases}$$

Ұқсас жүйені келтіргеннен кейін теңдеулер мына түрді қабылдайды

$$\begin{cases} 12,6 \cdot \Delta Q_{1,2} + 1,4 \cdot \Delta Q_{2,3} + 4,5 \cdot \Delta Q_{3,5} = 15,75; \\ -3 \cdot \Delta Q_{1,2} + 5,4 \cdot \Delta Q_{2,3} - \Delta Q_{3,5} = -14,5; \\ -2,4 \cdot \Delta Q_{1,2} - \Delta Q_{2,3} + 7,9 \cdot \Delta Q_{3,5} = -27,25. \end{cases}$$

Аталған жүйені шеше отырып, мысалы, Гаусс әдісімен, ауа шығынына енгізілетін түзетулердің келесі мәндерін табамыз:

$$\Delta Q_{1,2} = 2,498 \text{ м}^3/\text{с}; \quad \Delta Q_{2,3} = -1,839 \text{ м}^3/\text{с}; \quad \Delta Q_{3,5} = -2,923 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Табылған түзетулер есебінен ауаның қабылданған шығындарын түзетеміз.

$$\begin{aligned} Q_{1,2} &= 45 + 2,498 = 47,498 \text{ м}^3/\text{с}; & Q_{2,3} &= 35 - 1,839 = 33,161 \text{ м}^3/\text{с}; \\ Q_{3,5} &= 25 - 2,923 = 22,077 \text{ м}^3/\text{с}; & Q_{2,4} &= 47,498 - 33,161 = 14,337 \text{ м}^3/\text{с}; \\ Q_{3,4} &= 33,161 - 22,077 = 11,084 \text{ м}^3/\text{с}; & Q_{4,5} &= 47,498 - 22,077 = 25,421 \text{ м}^3/\text{с}. \end{aligned}$$

Түзетілген ауа шығындары үшін жоғарыда баяндалған әдістемес бойынша контур бойынша депрессия алшақтығын тексереміз.

$$\begin{aligned} \Delta h_1 &= 0,02 \cdot 47,498^2 + 0,02 \cdot 33,161^2 + 0,09 \cdot 22,077^2 + 0,12 \cdot 47,498^2 - 380 = 1,708 \text{ даПа}; \\ \Delta h_2 &= 0,02 \cdot 33,161^2 + 0,05 \cdot 11,084^2 - 0,15 \cdot 14,337^2 = -2,694 \text{ даПа}; \\ \Delta h_3 &= 0,09 \cdot 22,077^2 - 0,06 \cdot 25,421^2 - 0,05 \cdot 11,084^2 = -1,05 \text{ даПа}. \end{aligned}$$

Өйткені контур бойынша депрессия алшақтығы берілген дәлдіктен асып кетеді, онда ауаның түзетілген шығындарына жаңа түзетулерді енгізуді анықтау қажет. Бұл үшін ауа шығындарының түзетілген мәндерін ескеретін жаңа теңдеулер жүйесін қалыптастырамыз:

$$\left\{ \begin{aligned} &2 \cdot 0,02 \cdot 47,498 \cdot \Delta Q_{1,2} + 2 \cdot 0,02 \cdot 33,161 \cdot \Delta Q_{2,3} + 2 \cdot 0,09 \cdot 22,077 \cdot \Delta Q_{3,5} + \end{aligned} \right.$$

$$\begin{aligned}
& + 2 \cdot 0,12 \cdot 47,498 \cdot \Delta Q_{1,2} + 1,708 = 0; \\
2 \cdot 0,02 \cdot 33,161 \cdot \Delta Q_{2,3} + 2 \cdot 0,05 \cdot 11,084 \cdot (\Delta Q_{2,3} - \Delta Q_{3,5}) - \\
& - 2 \cdot 0,15 \cdot 14,337 \cdot (\Delta Q_{1,2} - \Delta Q_{2,3}) - 2,694 = 0; \\
2 \cdot 0,09 \cdot 22,077 \cdot \Delta Q_{3,5} - 2 \cdot 0,06 \cdot 25,421 \cdot (\Delta Q_{1,2} - \Delta Q_{3,5}) - \\
& - 2 \cdot 0,05 \cdot 11,084 \cdot (\Delta Q_{2,3} - \Delta Q_{3,5}) - 1,05 = 0.
\end{aligned}$$

Ұқсастықтарды келтіргеннен кейін, аламыз

$$\begin{cases}
13,2994 \cdot \Delta Q_{1,2} + 1,3265 \cdot \Delta Q_{2,3} + 3,9739 \cdot \Delta Q_{3,5} = -1,708; \\
-4,3010 \cdot \Delta Q_{1,2} + 6,7359 \cdot \Delta Q_{2,3} - 1,1084 \cdot \Delta Q_{3,5} = 2,694; \\
-3,0505 \cdot \Delta Q_{1,2} - 1,1084 \cdot \Delta Q_{2,3} + 8,1328 \cdot \Delta Q_{3,5} = 1,05.
\end{cases}$$

Осы жерде ұсынылады

$$\Delta Q_{1,2} = -0,188 \text{ м}^3/\text{с}; \quad \Delta Q_{2,3} = 0,296 \text{ м}^3/\text{с}; \quad \Delta Q_{3,5} = 0,099 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Табылған түзетулер есебінен желдету желісіндегі тармақтар бойынша ауаның жаңа шығындары тең болады

$$\begin{aligned}
Q_{1,2} &= 47,498 - 0,188 = 47,310 \text{ м}^3/\text{с}; & Q_{2,3} &= 33,161 + 0,296 = 33,457 \text{ м}^3/\text{с}; \\
Q_{3,5} &= 22,077 + 0,099 = 22,176 \text{ м}^3/\text{с}; & Q_{2,4} &= 47,31 - 33,457 = 13,853 \text{ м}^3/\text{с}; \\
Q_{3,4} &= 33,457 - 22,176 = 11,281 \text{ м}^3/\text{с}; & Q_{4,5} &= 47,31 - 22,176 = 25,134 \text{ м}^3/\text{с}.
\end{aligned}$$

Қайтадан табылған шығындар үшін бірінші, екінші, үшінші контур бойынша депрессия алшақтығын тексеруді қайталаймыз:

$$\begin{aligned}
\Delta h_1 &= 0,02 \cdot 47,31^2 + 0,02 \cdot 33,457^2 + 0,09 \cdot 22,176^2 + \\
& + 0,12 \cdot 47,31^2 - 380 = 0,0001 \text{ даПа}; \\
\Delta h_2 &= 0,02 \cdot 33,457^2 + 0,05 \cdot 11,281^2 - 0,15 \cdot 13,853^2 = 0,0354 \text{ даПа}; \\
\Delta h_3 &= 0,09 \cdot 22,176^2 - 0,06 \cdot 25,134^2 - 0,05 \cdot 11,281^2 = 0,0064 \text{ даПа}.
\end{aligned}$$

Осымен есептерді шешу аяқталады, себебі есептеудің берілген дәлдігіне қол жеткізілді.

## 4.2 Желдету жүйесінің есептік аэродинамикалық модельдері және оларды түрлендіру

### 4.2.1 Есептік желдету сұлбасын түрлендіруде пайдаланылатын тәсілдер туралы жалпы мәліметтер

Желдетудің барынша күрделі жүйесі қазіргі заманғы жүздеген шахталар мен кеніштердің желдету желілері, сонымен қатар олардың мыңдаған тармақтары - тау-кен өнеркәсіптерінің желдету желілері болып табылады. Жер асты тау-кен қазбаларындағы ауа ортасының жағдайын бағалау және сол жерлердің ауасын желдетудің қолайлы нұсқаларын таңдау шахталық желдету жүйесін талдаудың қазіргі заманғы әдісін пайдаланумен байланысты, оларды табысты іске асыру мына үш ақпарат көзінің болуына байланысты:

- желдету желісінің есептік аэродинамикалық моделі;
- есептеу модельдеріне кедергілер массиві;

– тартым көздері туралы деректер.

Жалпы ақпараттық блокта басымдық мәндер есептеу моделіне жатады, себебі онда негізгі топологиялық ақпарат баяндалады, ол ақпаратсыз желдету жүйесін басқару бойынша міндеттерді шешу мүмкін емес.

Есептік аэродинамикалық моделінің физикалық аналогы желдетудің көп өлшемді және күрделі объектісін білдіретін нақты желдету желісі болып табылады. Есептік аэродинамикалық моделі түріндегі шахталық желдету желісін бейнелеу еңбек сыйымдылықты процесс болып табылады, көмір шахталарына арналған тау-кен жұмыстарының жоспарын кеңістікті мағыналауға, сондай-ақ деңгей жиек бойынша жоспар және кеніштерді желдетудің аксонометриялық сұлбасына сүйенеді. Практикада байқалғандай, желдету жүйесінің есептеу моделін құру кезіндегі күрделі факторлар мынада, яғни тау-кен жұмыстары кеңістік пен уақытқа үздіксіз орналасады, яғни өз пішіні мен жағдайын жиі өзгертеді.

Тау-кен сызбаларын жүйелік толтыру қажеттілігі оқшауланған учаскелер желдету жоспарында үнемі салына бермейді, қолданыстағы қазбалар олармен шоғырланған және бытыраған түрде жиі байланыста болса да, енбей қалады. Жеке қазбалар, деңгей жиектер мен үстіңгі беттері арасындағы өте күрделі және бақылауға алынбайтын аэродинамикалық байланыстар пайда болады, соның салдарынан опырылған және құлаған жерлері көп болатын кеніштердегі желдету желісі туралы сенімді ақпараттарды үнемі алу мүмкін емес. Мұндай учаскелерде аэродинамикалық түсірімдерді сапалы өткізу қауіпсіздігінің жағдайы бойынша мүмкін емес, яғни өз кезегінде базалық модульдерді құру кезінде белгілі бір қиыншылықтар тудырады, нақты желдету желісі туралы бейнелейді және оларға энергетикалық жағынан ұқсас болуы мүмкін.

Есептеу дәлдігінің белгісі, жұмыстың кез келген нақты режимінде есептеу тұрақтылығы бойынша, кему тармақтарына қатыстылығы бойынша, желдету желісінде ағынды бөлуге сол немесе басқа элементтің әсер ету дәрежесі бойынша есептеу сұлбасынан жеке тармақтарды алып тастау керек. Мұндай түрдегі ықшамдау, негізінен, шахта мен кеніштердің ауа-депрессиялық түсірімінің нәтижесі бойынша есептеу сұлбасын құру сатысында орындалады. Тармақтың ауасы мен депрессиясын нақты өлшеу арқылы, келесі шарттарды алу оңай

$$\frac{2 R_i q_i^2}{\sum h_i} \leq 0,01 \varepsilon, \quad (4.52)$$

мұнда  $R_i$  – шығарылатын тармақтардың кедергісі;

$q_i$  – есептеу сәтінде тармақтар бойынша ауаның нақты шығыны;

$\sum h_i$  –  $i$ -лі тармақты енгізетін контурда арынның қосынды шығыны;

$\varepsilon$  – есептеудің берілген дәлдігі.

Өйткені ауа бақыланатын шама болып табылады, онда (4.52) есептеудің берілген дәлдігі кезінде  $q_i$  максимум мәні анықталады, сол кезде  $i$ -лі тармақ желіден шығарылуы мүмкін;

$$q_{i,max} = (0,005 R_i^{-1} \varepsilon \sum h_i)^{0,5}. \quad (4.53)$$

Бұл жағдайда  $\sum h_i$  желідегі жоспарланған өзгерістерге дейін нақты өлшеу бойынша анықталады. Практикада байқалғандай (4.53) шартына жауап беретін барлық тармақтар деңгей жиектер арасындағы оқпан учаскелері, қабаттар арасындағы негізгі қвершлагтар және т.б. болып табылады. Осы белгілері бойынша есептеу сұлбасынан ұзақ мерзімді уақыт ішіндегі ауаның маңызды емес тербелістеріне ие тармақтарды алып тастауға болады. Бұл оқпан маңындағы бірқатар қазбалар, зарядты камералар, гараждар, қазылған кеңістіктер және т.б. болып табылады. Мұндай тармақтарды алып тастаған кезде ондағы ауа шығынын тораптық нүктелерге енгізуді ұсынады. Бұл әрі қарай есептеулер үшін біршама қиыншылықтар тудырады, өйткені сұлбада ауа шығындарының ұзындығы бойынша әртүрлі тармақтар пайда болады. Осы топқа кему тармақтары сұлбасынан шығарылғандарды жатқызуға болады.

Есептеу сұлбасын құру кезінде үлкен кедергілері мен ауаның аз жұмсалуды болатын тармақтар шығарылған кездегі нұсқалар мүмкін. Бұл ретте сұлбаға ұқсас тармақтарды енгізу немесе енгізбеу туралы мәселе кедергі шамасына және депрессиясына байланысты әрбір нақты жағдай үшін шешілуі тиіс.

Бір шығу мен кіру, бір эквивалентті тармағы бар жеке тұйық контурларды айырбастау нұсқалары мүмкін. Контурдағы ауаның бөлінуі және контурға келіп түсетін  $Q$  ауаның жалпы жұмсалуды біле отырып  $h$  кіру мен шығудың тораптық нүктелері арасындағы депрессияның жалпы шамасы анықталады. Контурдың жалпы кедергісі  $R = h/Q^2$  өрнектен анықталады.

Талдау көрсеткендей, түрлендірудің жоғарыда көрсеткен тәсілдері желі өлшемдігін маңызды азайтуды бермейді. Бірізділікті-параллель қосылыстарды айырбастау және тартым көздерін алмастыру, белсендірілген сипаттаманы құрумен қатар олардың жалпы санынан тармақтардың санын 20 %-ға азайтуға мүмкіндік береді, яғни желдету желісін бұрынғыша түрлендіру жүздеген тармақты қамтуы мүмкін, соған байланысты оның өлшемдігіне байланысты талдау қиыншылықтары жойылмайды.

Дәл әдістер кеніштің аэрологияда кеңінен белгілі, негізінен, есептеу сұлбаларын түрлендірудің бастапқы кезеңінде пайдаланылады. Айырбасталатын қосылысқа эквивалентті тармақ кедергісін есептеу желінің негізгі заңдарына сәйкес орындалады. Бұл түрлендіру тәсілдері, түрлендіру желісіндегі ауаны бөлу қажеттілігі жоқ болған жағдайда ғана ақтайды.

Есептік желдету модельдерін құру және түрлендіру, оларды талдауға дайындауда пайдаланылатын әдістердің негізгі кемшіліктері мынада, яғни түрлендіру алгоритмдері ауа құбырында қосылу типін және олардың күрделілігін есепке алатын желдету желісінің берілген топологиясында қатаң бірізділікте орындалады, әрбір желдету желісіне нақты амалды талап етеді.

Опырылған жерлер, қиратылған жерлерге және басқа апатты жағдайларға байланысты ауқымды жер асты қазбалары арасындағы бұзылған аэродинамикалық байланыстың бар болуы кезінде есептік аэродинамикалық модельдерін құру мен түрлендіру үшін қарастырылған алгоритмдерді пайдалану қажет.

#### 4.2.2 Желдету сұлбасын жергілікті түрлендіру тәсілдері

Есептеу сұлбасын құру және түрлендірудің жоғарыда қарастырылған әдістері барлық желдету жүйесі бойына қатысты. Бұл әрдайым қолайлы емес, себебі қолданыстағы шахталар мен кеніштер жағдайында қарқынды өзгерістерге тек жекелеген объектілер ғана ұшырайды (шығару учаскелерін, олардың түйісуі кезінде тұйық қазбаларды немесе далдасаларды, желдету есіктерін, шлюздерді, опырылған жерлерді және т.б. бөліктеу), сондай-ақ оқпан маңындағы желі фрагменттері, негізгі ауа беретін және ауа шығаратын жолдар мүлдем өзгермейді. Осы байланыста түрлендірудің жергілікті тәсілдеріне көшу керек, оны жан-жақты талдау және желдету шарттарын анықтау үшін, бастапқы сұлбаның қалған бөлігін өлшемділігі аз оның эквивалентімен айырбастау үшін, яғни есептеу сұлбасының өзгерістерге барынша ұшырайтын бөлігін сақтау керек.

Түрлендірудің жергілікті тәсілдерін табысты іске асыру, егер солардың негізінде құрылған желдету сұлбалары келесі талаптарды орындауды қамтамасыз еткен жағдайда ғана мүмкін.

1. Түрлендіретін желіде параметрлер аппроксимациялау аймағы жерасты қазбаларын желдету жағдайларын бағалау бойынша шешілетін міндеттердің барынша кең диапазонын қанағаттандыруы тиіс.

2. Орындалатын түрлендірулер шахталық желдету желісі тармағының кез келген санын ауа беретін оқпандар және негізгі желдету желдеткіштерін қалдырғанға дейін қысқарту мүмкіндіктеріне рұқсат беруі тиіс.

3. Түрлендіруге ұшырамайтын қалған тармақтарда ауаны бөлу бойынша есептеу нәтижелері ықшамдалған желдету сұлбасында шекаралық жағдайларды өзгерту процесінде нақты желдету желісіндегі тармақтарға ұқсас болуы тиіс.

4. Орындалатын түрлендірулер шахта аумағында анық емес топологиясы бар учаскелерде (опырылған жерлер, құлаған жерлер, су басқан жерлер және т.б.) желдету сұлбасының есептеу аналогын құру мүмкіндігін қамтамасыз етуі тиіс, онда депрессиялық түсірімдерді өткізу шектелген немесе қауіпсіздік мәселелері бойынша мүмкін емес.

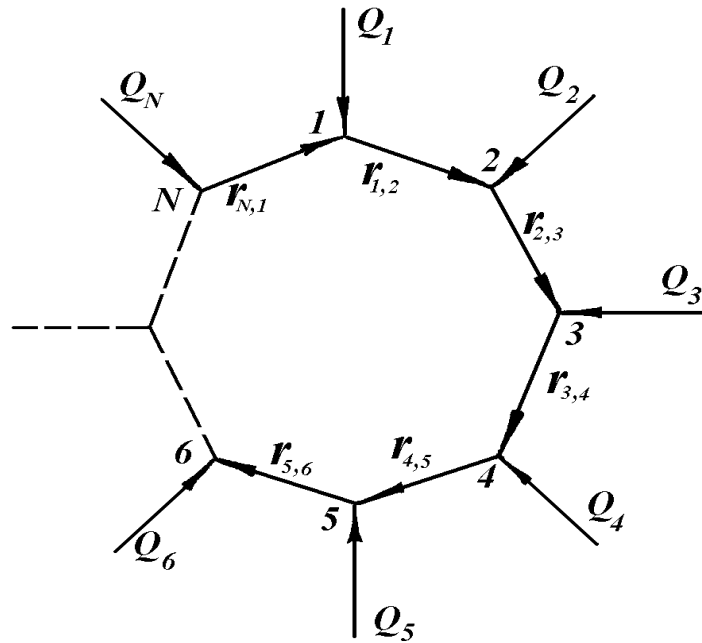
Мұндай түрлендіруді аппроксимациялаушы көпбұрыштар көмегімен жүзеге асыруға болады.

4.9-суретте қарапайым көпбұрыш сұлбасы берілген, адекватты модельде бастапқы желіні түрлендіруге мүмкіндік береді.

Жалпы жағдайда аталған құрылымның синтезі  $R_{ij}$  көпбұрыштар тарапына қарай  $N$  белгісіз кедергілерді және оларға  $N$  жолай кездескен  $Q_{ij}$

белгісіз шығындарды анықтауға байланысты, яғни анықталатын шамалардың жалпы саны  $2N$  құрайды, мұнда  $N$  – көпбұрыштардағы тораптар саны.

Көпбұрыштағы тораптар мен тараптардың жалпы саны түрленетін учаскенің көлеміне байланысты және әрбір нақты жағдайда шешілетін міндеттер шарттарымен анықталады.



4.9 – сурет. Аппроксимациялаушы көпбұрыштың жалпы түрі

Түрлендіру процесі келесілерден тұрады. Желдету жүйесінің бастапқы жағдайы ретінде екі базалық режим таңдап алынады, олар есептеу арқылы немесе есептеу сұлбасының кез келген элементтері өзгерген кезде шахта жағдайында аталған өлшеулер бойынша алынуы мүмкін.

Бірінші базалық режим бойынша көп бұрышты сипаттайтын теңдеулер жүйесі мына түрде болады:

$$\left\{ \begin{array}{l} Q'_1 = Q'_{1,2} - Q'_{N,1} ; \\ Q'_2 = Q'_{2,3} - Q'_{1,2} ; \\ \dots \dots \dots \\ Q'_{N-1} = Q'_{N-1,N} - Q'_{N-2,N-1} \\ H'_{1,2} = R'_{1,2} ( Q'_{1,2} )^2 ; \\ H'_{2,3} = R'_{2,3} ( Q'_{2,3} )^2 ; \\ H'_{2,3} = R'_{2,3} ( Q'_{2,3} )^2 ; \\ \dots \dots \dots \\ H'_{N,1} = R'_{N,1} ( Q'_{N,1} )^2 . \end{array} \right. \quad (4.54)$$



Жүйе  $N - 1$  желінің алғашқы заңы бойынша тораптарға арналған теңдеулер және екінші заңы бойынша көпбұрыштың сыртқы контурларына арналған теңдеулерге есептеледі, яғни теңдеулердің жалпы саны  $2N - 1$  құрайды, талап етілгеннен бірлікке аз. Екінші базалық режимге сәйкес келетін теңдеулер жүйесін құраймыз

$$\left\{ \begin{array}{l} Q_1'' = Q_{1,2}'' - Q_{N,1}'' ; \\ Q_2'' = Q_{2,3}'' - Q_{1,2}'' ; \\ \dots \dots \dots \dots \dots \dots \\ Q_{N-1}'' = Q_{N-1,N}'' - Q_{N-2,N-1}'' \\ H_{1,2}'' = R_{1,2}'' ( Q_{1,2}'' )^2 ; \\ H_{2,3}'' = R_{2,3}'' ( Q_{2,3}'' )^2 ; \\ H_{2,3}'' = R_{2,3}'' ( Q_{2,3}'' )^2 ; \\ \dots \dots \dots \dots \dots \dots \\ H_{N,1}'' = R_{N,1}'' ( Q_{N,1}'' )^2 , \end{array} \right. \quad (4.55)$$

мұнда  $Q_1, Q_2, \dots, Q_N$  – көпбұрыштардың тораптарына келетін немесе шығатын ауаның шығыны;  
 $H_{1,2}, H_{2,3}, \dots, H_{N,1}$  – көпбұрыш тораптары арасындағы тармақтар депрессиясы.

Өйткені желдетудің көп полюстығы екі базалық режимді қанағаттандыруы тиіс, онда шарттарды орындау табиғи болып табылады

$$R'_{ij} = R''_{ij} = R_{ij} . \quad (4.56)$$

Желінің екінші заңы бойынша құрылған сәйкес (4.54) және (4.55) теңдеулерді салыстыра отырып және (4.56) назарға алып, мына қорытындыға келеміз

$$K_{ij} = \frac{Q''_{ij}}{Q'_{ij}} , \quad (4.57)$$

мұнда  $K_{ij}$  – әрекет коэффициенті. Мына формула бойынша анықталады:

$$K_{ij} = \sqrt{\frac{H''_{ij}}{H'_{ij}}} . \quad (4.58)$$

(4.58) өрнегі желдету желісінде жұмыс режимі өзгерген кезде көпбұрыштың сол тармақтарында ауаның жұмсалуды арасындағы өзара байланысты белгілейді, бір режимдегі ауаның жұмсалудынан басқа режимге сәйкес келетін ауаның жұмсалудына өзара ауысуға мүмкіндік береді.

Аталған қасиеттерді пайдалана отырып, жүйенің сызықтық теңдеулер (4.54) тобын жүйенің (4.56) басқа бір теңдеуімен толтырамыз. Бұл ретте толықтырушы теңдеуді таңдау таңдалған базалық торапқа сәйкес келуі тиіс. Әрі қарайғы талдау қарапайымдылығы үшін жүйенің бірінші теңдеуіне тоқталамыз (4.55), көпбұрыштың бірінші торабымен байланысты. Таңдап алынған теңдеуде (4.57) тәуелділікті пайдалана отырып, бірінші базалық режимнің ауаның жұмсалуды арқылы екінші базалық жағдайға сәйкес келетін ауаның жұмсалуды айырбастауды жүзеге асырамыз, қорытындысында мынаны аламыз

$$\begin{cases} Q'_1 = Q'_{1,2} - Q'_{N,1}; \\ Q''_1 = K_{1,2}Q'_{1,3} - K_{N,1}Q'_{N,1}; \\ Q'_2 = Q'_{2,3} - Q'_{1,2}; \\ \dots \\ Q'_{N-1} = Q'_{N-1,N} - Q'_{N-2,N-1}, \end{cases} \quad (4.59)$$

бірінші базалық режимнің барлық белгісіз  $Q'_{ij}$  ағындарын табамыз.

Жүйенің (4.54) теңдеуінің сызықтық емес тобына қайтып келіп, көпбұрыштың  $R_{ij}$  барлық жағынан ізделетін кедергіні анықтаймыз, яғни.

$$\begin{aligned} R_{1,2} &= \frac{H'_{1,2}}{(Q'_{1,2})^2}; \\ R_{2,3} &= \frac{H'_{2,3}}{(Q'_{2,3})^2}; \\ &\dots \\ R_{N,1} &= \frac{H'_{N,1}}{(Q'_{N,1})^2}. \end{aligned} \quad (4.60)$$

Түрлендіруге күрделі желдету желісін дайындау әдістемесі келесі операцияларды орындауды енгізеді:

- желдету сұлбасы бойынша алдын ала түрлендіруге қажетті желі фрагменттері пішінделген тораптар байқалады;
- белгіленген тораптардың әрқайсысы біріншісі үшін қабылданады;
- бірінші тораптан бастап сұлбада көрсетілген реттегі тораптар номері жазылады. Аталған тораптар қалған желілермен көпбұрыштың байланыс

тораптары болып табылады. Жұмыс кезінде барынша қолайлықты жасау мақсатында байланыс тораптарының тексеру тәртібін өзінің қарауы бойынша өзгертуге болады;

– белгіленетін тораптарға енетін тармақтар және қалған желімен байланыстың тармағы болып табылатындар шығарылмайды;

– желдету сұлбасында көпбұрыштың қажетті санын құрумен түрлендіру учаскелерінде аналогтық түрде белгіленеді, екі аралас тораптары арасында бір және одан артық байланыс тармақтары болуы мүмкін.

Жоғарыда қарастырылғандарды баяндай отырып, яғни көпбұрышты, есептеу сұлбасының аппроксимациялаушы учаскесін салудың келесі алгоритміне көшеміз.

1. Шахтаның есептеу желдету сұлбасы құрылады. Түрлендіруге жататын учаскелер анықталады. Ықшамдалатын учаскелерді пішімдейтін және бір уақытта көпбұрыш төбесі болып табылатын тораптар анықталады.

2. Табиғи ағынды бөлудің бірінші базалық нұсқасы есептеледі, сол нұсқалардың деректері бойынша:

а)  $Q'_i, i = 1, 2, \dots, N$ ; таңдап алынған тораптары үшін ауаның бағыты мен шығыны анықталады;

б)  $P'_i, i = 1, 2, \dots, N$ , тораптық қысымы болады, содан кейін  $H'_{ij} = P'_j - P'_i$  көпбұрыштың тораптары арасындағы арын есептеледі.

3. Есептеу сұлбасында реттеуші (бір немесе бірнеше) қазбалар немесе тартым күштеріне аэродинамикалық параметрдің жаңа мәндері беріледі. 2 пунктке ұқсас деректер бойынша екінші базалық режимді есептеу жүргізіледі, бағыты мен  $Q''_i, i = 1, 2, \dots, N$  және  $H''_{ij}$  сандық мәндері табылады.

4.  $i$ -лі базалық торап таңдап алынады, сол үшін (4.58) сәйкес  $K_{i,i-1}$  және  $K_{i,i+1}$  коэффициенттері есептеледі.

5. Таңдап алынған көп полюстік үшін желінің бірінші заңы бойынша базалық тораптан (4.59) түрдегі теңдеулердің сызықтық жүйесі құрылады, яғни онда  $Q'_{ij}$  белгісіз ағындар анықталады.

6. (4.60) формуласы бойынша  $R_{ij}$  тармақтың ізделетін кедергісі табылады.

Түрлендірудің қарастырылған алгоритміне сол бір базалық режим негізінде белгілі немесе анықталмаған топологиясы бар тұтастай немесе оның жекелеген фрагменттерін желдету жүйесіне айырбастайтын аналогтардың кез келген санын құруға рұқсат етеді.

Баяндалған алгоритм бойынша түрлендіру процесі екі базалық режимнің тапсырмасын, яғни желінің барлық тамақтары және байланыс тораптарындағы қысым бойынша ауаның белгілі шығындары бар бастапқы желдету жүйесінің екі белгіленген жағдайын талап етеді. Себебі желдету желісінің әртүрлі базалық жағдайын пайдалану түрлендіру дәлдігіне әлсіз әсер етеді, онда барынша басым нұсқа арқылы желдету жүйесінде ауаны табиғи бөлу бірінші базалық режим ретінде пайдалану мүмкіндігі болып табылады, ал екінші базалық режимді

жұмыстың ұсынылатын аймағынан 20...30 % негізгі желдету желдеткіші депрессиясының өзгерісі кезінде шахта жағдайында есептеу немесе өлшеу арқылы табуға болады.

Пассивті элементтерді пайдалану кезінде базалық режимді анықтау үшін тармақтағы аэродинамикалық кедергілер шамасын 25...40 %-ға азайту қажет. Кедергіні ұлғайту қажет емес, өйткені бұл байланыс тармақтарында ауаның аз жұмсалудың пайда болуына әкелуі мүмкін, ал бұл өндіріс жағдайында қажетті деректерді алу үшін өлшеулерді орындау кезінде немесе есептеу процесінде қателердің пайда болуына мүмкіндік туғызады.