

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ БІЛІМ ЖӘНЕ ҒЫЛЫМ МИНИСТРЛІГІ



Қ. Тұрысов атындағы геология, мұнай және тау-кен ісі институты

Мұнай инженериясы кафедрасы

Асарбаева А.А., Жолды Н.М..

Сканерленген үлгінің сулану қабілетінің кеуекті ортадағы екі фазалы сұйықтық ағынына әсерін зерттеу

ДИПЛОМДЫҚ ЖОБА

5В070800–Мұнай-газ ісі

Алматы 2021




Қ. Тұрысов атындағы геология, мұнай және тау-кен ісі институты

Мұнай инженерия кафедрасы

ҚОРҒАУҒА ЖІБЕРІЛДІ

Мұнай инженерия
кафедрасының
меңгерушісі

Дайров Жасулан Кайратович,
магистр



Дипломдық жобаға
ТҮСІНІКТЕМЕЛІК ЖАЗБА

Тақырыбы: “Сканерленген үлгінің сулану қабілетінің кеуекті ортадағы екі фазалы сұйықтық ағынына әсерін зерттеу”

5В070800-Мұнай-газ ісі

Орындағандар: Асарбаева А.А., Жолды Н.М..

Ғылыми жетекші
PhD (Доктор PhD, ассистент-
профессор)

Кудайкулов Азиз
Анарбаевич

Подписано
цифровой подписью:
Азиз Кудайкулов
Дата: 2021.05.18
15:16:41 -04'00"

Метаданные

Название

Сканерленген үлгінің сулану қабілетінің кеуекті ортадағы екі фазалы сұйықтық ағынына әсерін зерттеу

Автор

Асарбаева Айшолпан, Жолды Назым

Научный руководитель

Азиз Кудайкулов

Подразделение

ИГНИГД

Список возможных попыток манипуляций с текстом

В этом разделе вы найдете информацию, касающуюся манипуляций в тексте, с целью изменить результаты проверки. Для того, кто оценивает работу на бумажном носителе или в электронном формате, манипуляции могут быть невидимы (может быть также целенаправленное вписывание ошибок). Следует оценить, являются ли изменения преднамеренными или нет.

Замена букв		1
Интервалы		0
Микропробелы		0
Белые знаки		0
Парафразы (SmartMarks)		0

Объем найденных подоби

Обратите внимание! Высокие значения коэффициентов не означают плагиат. Отчет должен быть проанализирован экспертом.



25

Длина фразы для коэффициента подобия 2



6058

Количество слов



49899

Количество символов

Подобия по списку источников

Просмотрите список и проанализируйте, в особенности, те фрагменты, которые превышают КП №2 (выделенные жирным шрифтом). Используйте ссылку «Обозначить фрагмент» и обратите внимание на то, являются ли выделенные фрагменты повторяющимися короткими фразами, разбросанными в документе (совпадающие сходства), многочисленными короткими фразами расположенные рядом друг с другом (парафразирование) или обширными фрагментами без указания источника ("критициаты").

10 самых длинных фраз

Цвет текста

ПОРЯДКОВЫЙ НОМЕР	НАЗВАНИЕ И АДРЕС ИСТОЧНИКА URL (НАЗВАНИЕ БАЗЫ)	КОЛИЧЕСТВО ИДЕНТИЧНЫХ СЛОВ (ФРАГМЕНТОВ)	
1	Алматы метрополитенінің көмекші жазық Қазбаларының Құрылысын жобалау Намазбай Назира 5/2/2018 Satbayev University (Г_М_И)	15	0.25 %
2	https://zkgmu.kz/docs/nauka/Inform-sobshen.pdf	9	0.15 %

из базы данных RefBooks (0.00 %)

ПОРЯДКОВЫЙ НОМЕР	НАЗВАНИЕ	КОЛИЧЕСТВО ИДЕНТИЧНЫХ СЛОВ (ФРАГМЕНТОВ)
------------------	----------	---

из домашней базы данных (0.25 %)

ПОРЯДКОВЫЙ НОМЕР	НАЗВАНИЕ	КОЛИЧЕСТВО ИДЕНТИФНЫХ СЛОВ (ФРАГМЕНТОВ)	
1	Алматы метрополитенінің көмекші жазық қазбаларының құрылысын жобалау Намазбай Назира 5/2/2018 Satbayev University (Г_М_И)	15 (1)	0.25 %

из программы обмена базами данных (0.00 %)

ПОРЯДКОВЫЙ НОМЕР	НАЗВАНИЕ	КОЛИЧЕСТВО ИДЕНТИФНЫХ СЛОВ (ФРАГМЕНТОВ)	
------------------	----------	---	--

из интернета (0.15 %)

ПОРЯДКОВЫЙ НОМЕР	ИСТОЧНИК URL	КОЛИЧЕСТВО ИДЕНТИФНЫХ СЛОВ (ФРАГМЕНТОВ)	
1	https://zkgmu.kz/docs/nauka/Inform-sobshen.pdf	9 (1)	0.15 %

Список принятых фрагментов (нет принятых фрагментов)

ПОРЯДКОВЫЙ НОМЕР	СОДЕРЖАНИЕ	КОЛИЧЕСТВО ИДЕНТИФНЫХ СЛОВ (ФРАГМЕНТОВ)
------------------	------------	---



Қ. Тұрысов атындағы геология, мұнай және тау-кен ісі институты

Мұнай инженерия кафедрасы

5B070800 - Мұнай-газ ісі

БЕКІТЕМІН

Мұнай инженерия
кафедрасының меңгерушісі
Дайров Жасулан Кайратович,
магистр

**Дипломдық жұмыс орындауға
ТАПСЫРМА**

Білім алушы: Асарбаева А.А., Жолды Н.М..

Тақырыбы: Бір және екі фазалы сұйықтықтың кеуекті ортадағы ағынын зерттеу”
Университет Ректорының 20 20 жылғы " 24 " қараша № 2131-б бұйрығымен
бекітілген Аяқталған жұмысты тапсыру мерзімі 2021 жылғы "18" мамыр.

Дипломдық жұмыстың бастапқы берілістері:

Дипломдық жұмыста қарастырылатын мәселелер тізімі

а) Кеуекті ортаның микроқұрылымының математикалық сипаттамасы және мақсаты

б) Арнайы бөлім

в) Анализдеу бөлімі

Сызба материалдар тізімі (міндетті сызбалар дәл көрсетілуі тиіс): *Өткізгіштіктің кеуектілікке қатысты мәндері, беттік керілу коэффициентінің әртүрлі мәндеріндегі байланыс бұрышының өзгеруі, сырғу қалыңдығының әртүрлі мәндеріндегі байланыс бұрышының өзгеруі, қысым градиентінің әртүрлі мәндеріндегі байланыс бұрышының өзгеруі.*






Сызба материалдары 25 слайдта көрсетілген

Ұсынылатын негізгі әдебиеттер: 12 атаудан тұрады

Дипломдық жұмысты (жобаны) дайындау
КЕСТЕСІ

Бөлімдератауы, қарастырылатын мәселелертізімі	Ғылыми жетекші мен кеңесшілерге көрсету мерзімдері	Ескерту
Үлгінің суланғыштығын өзгерту тәсілдерін және оның кеуекті ортадағы екі фазалы сұйықтық ағынына әсері шолу жасау	15.03.2021ж.-20.03.2021ж..	Орындалды
Суланудың осы ағынға әсерін ескере отырып, кеуекті ортадағы екі фазалы сұйық ағынының модельдерін шолу жасау	22.03.2021ж.–27.03.2021ж.	Орындалды
Үлгінің сулану қабілетінің кеуекті ортадағы екі фазалы сұйықтық ағынына әсерін зерттеу	29.03.2021ж.–03.04.2021ж.	Орындалды
Қорытынды бөлімі	5.04.2021ж.–10.04.2021ж.	Орындалды

Дипломдық жұмыс (жоба) бөлімдерінің кеңесшілері мен норма бақылаушының аяқталған жұмысқа (жобаға) қойған қолтаңбалары

Бөлімдератауы	Кеңесшілер, аты, әкесінің аты, тегі (ғылыми дәрежесі, атағы)	Қол қойылған күні	Қолы
Үлгінің суланғыштығын өзгерту тәсілдерін және оның кеуекті ортадағы екі фазалы сұйықтық ағынына әсері шолу жасау	А.А. Қудайкулов (PhD)	20.03.2021ж.	
Суланудың осы ағынға әсерін ескере отырып, екі фазалы сұйық ағынының модельдерін шолу жасау	А.А. Қудайкулов (PhD)	27.03.2021ж.	
Үлгінің сулану қабілетінің кеуекті ортадағы екі фазалы сұйықтық ағынына әсерін зерттеу	А.А. Қудайкулов (PhD)	03.04.2021ж.	
Қорытынды бөлімі	А.А. Қудайкулов (PhD)	10.04.2021ж.	
Норма бақылау	А.А. Қудайкулов (PhD)	20.04.2021ж.	

Тапсырманы орындауға алған білім алушы



Асарбаева А.

(қолы)



Жолды Н.

(қолы)

Күні "18"мамыр_2021ж.

АҢДАТПА

Дипломдық жұмыс негізгі 3 бөлімнен тұрады:

Алғашқы бөлімде кеуекті ортаның микроқұрылымының математикалық сипаттамасы және бірдей, кездейсоқ орналастырылған, өзара қиылысатын шарлардан тұратын кеуекті ортаның қатты фазасының кеуектілігі мен бетінің ауданын теориялық бағалау берілген. Содан кейін жоғарыда аталған ортаның қатты фазасының кеуектілігі мен бетінің ауданын анықтаудың сандық әдісінің сипаттамасы келтірілген және бөлімнің соңында кеуектіліктің теориялық және сандық мәні мен қатты фазаның беткі ауданын салыстыру келтірілген.

Арнайы бөлімнің бірінші тарауында кеуекті ортадағы бір фазалы сұйықтықтың ағымы зерттеледі. Сандық зерттеу әдісіне сүйене отырып, кездейсоқ орналастырылған, өзара қиылысатын, бірдей шарлардан тұратын кеуекті ортаның макроскопиялық параметрлері табылды және бұл сандық мәндер белгілі теориялық бағалаулармен салыстырылды.

Арнайы бөлімнің екінші тарауында кеуекті ортадағы екі фазалы сұйықтықтың ағымы, яғни интерфейс бетімен бөлінген екі араласпайтын сұйықтықтың ағымы зерттеледі. Алайда, осы бөлімде қарастырылған теңдеулерді екіден көп араласпайтын компоненттері бар сұйықтық ағымы үшін де қолдануға болады.

Қорытынды бөлімде жүргізілген жұмыстардың толық түсініктемесі берілген.

АННОТАЦИЯ

Дипломная работа состоит из 3 основных разделов:

В первом разделе дается математическое описание микроструктуры пористой среды и теоретическая оценка пористости и площади поверхности твердой фазы пористой среды, состоящей из одинаковых, беспорядочно расположенных, пересекающихся шаров. Затем приводится описание численного метода определения пористости и площади поверхности твердой фазы вышеупомянутой среды и в конце раздела приводится теоретико-численное значение пористости и сравнение площади поверхности твердой фазы.

В первой главе специального раздела исследуется течение однофазной жидкости в пористой среде. На основе численного метода исследования были найдены макроскопические параметры пористой среды, состоящей из случайно расположенных, пересекающихся между собой одинаковых шариков, и эти численные значения были сопоставлены с известными теоретическими оценками.

Во второй главе специального раздела исследуется поток двухфазной жидкости в пористой среде, т. е. поток двух несмешивающихся жидкостей, разделенных поверхностью раздела. Однако уравнения, рассмотренные в этом разделе, также могут быть использованы для потока жидкости с более чем двумя несмешивающимися компонентами.

В заключительной части дается подробное объяснение проведенных работ.

ANNOTATION

The thesis consists of 3 main sections:

The first section provides a mathematical description of the microstructure of a porous medium and a theoretical assessment of the porosity and surface area of the solid phase of a porous medium consisting of identical, randomly arranged, intersecting balls. Then a numerical method for determining the porosity and surface area of the solid phase of the above medium is described, and at the end of the section, a numerical-theoretical value of the porosity and a comparison of the surface area of the solid phase are given.

In the first chapter of the special section, the flow of a single-phase liquid in a porous medium is investigated. Based on the numerical method of investigation, the macroscopic parameters of a porous medium consisting of randomly arranged, intersecting identical balls were found, and these numerical values were compared with known theoretical estimates.

In the second chapter of the special section, we study the flow of a two-phase liquid in a porous medium, i.e., the flow of two immiscible liquids separated by the interface. However, the equations discussed in this section can also be used for a fluid flow with more than two immiscible components.

In the final part, a detailed explanation of the work carried out is given.

АНЫҚТАМАЛАР

Кеуекті орта-бұл қатты фазадан (қатты қаңқадан) және ортаның қатты фазалары арасында орналасқан қуыстардан тұратын орта.

Кеуек кеңістігі-бұл кеуекті орта қуыстарының ауданы.

Кеуек масштабындағы модельдеу (Pore - scale modelling) - кеуекті ортаның қуыс кеңістігіндегі сұйықтық ағынын оның күрделі геометриясын ескере отырып модельдеу.

Ірі масштабты модельдеу (кеуекті ортадағы сұйықтық ағынын макроскопиялық сипаттау) – мұндай модельдеу кезінде орта макроскопиялық қасиеттермен сипатталады (кеуектілік, өткізгіштік, қанықтылық, сүзу жылдамдығы және т.б.). Нүктедегі қасиеттердің мәні нүктенің айналасындағы элементар өкілдік көлем деп аталатын орташа есеппен анықталады (ЕРО немесе Rev - representative elementary volume). Осы типтегі модельдерді пайдалану үшін ЭӨҰ қоршаған ортаға тән сипаттамалардың статистикалық өкілдік жиынтығын қамтуы керек, сонымен бірге оның өлшемдері сүзу аймағының өлшемдерінен әлдеқайда аз болуы керек.

Кеуекті ортаның кеуектілігі-кеуекті орта қуыстарының көлемінің ортаның жалпы көлеміне қатынасы.

Кеуекті ортаның өткізгіштігі (абсолютті өткізгіштік) - бұл қысымның төмендеуі кезінде кеуекті ортаның сұйықтық арқылы өтуіне мүмкіндік беретін қасиеті.

Көп фазалы сұйықтық-бір-бірімен араласпайтын екі немесе одан да көп компоненттерден тұратын сұйықтық. Мысалы, су мен мұнай компоненттерінен тұратын сұйықтық.

Фазалық өткізгіштік-көп фазалы сұйықтықтың жеке компоненті үшін кеуекті ортаның өткізгіштігі. Фазалық өткізгіштік сұйықтық компоненттерінің қанығу дәрежесіне және олардың физика-химиялық қасиеттеріне байланысты.

Салыстырмалы фазалық өткізгіштік-фазалық өткізгіштіктің абсолютті өткізгіштікке қатынасы.

Сұйықтық көлемінің әдісі (Volume of Fluid method, VOF) - көпфазалы сұйықтық фазасының бетін жуықтауға арналған сандық әдіс. Ол Эйлер әдістері класына жатады, бұл көп фазалы сұйықтықтың фазалық бөлімінің бетінің пішіні мен орналасуын бақылауға мүмкіндік беретін алгоритм.

МАЗМҰНЫ

	КІРІСПЕ	
1	Кеуекті орта: Сипаттама	13
1.1	Кеуекті ортаның геометриялық түсініктемесі	19
1.2	Кеуекті ортаны анықтау	20
	АРНАЙЫ БӨЛІМ	
2	Кеуекті ортадағы бір фазалы сұйықтықты ағымы	20
2.1	Бірдей, бір-біріне параллель, мезгіл-мезгіл орналасқан цилиндрлерден тұратын ортаның өткізгіштігін теориялық бағалау	21
2.2	Бірдей, мезгіл-мезгіл орналастырылған шарлардан тұратын ортаның өткізгіштігін теориялық бағалау	22
2.3	Көптеген кездейсоқ орналасқан, өзара қиылысатын, бірдей шарлардан тұратын ортаның өткізгіштігін теориялық бағалау	23
2.4	Тұтқыр сығылмайтын сұйықтық үшін Навье-Стокс теңдеуін шешудің сандық әдістеріне шолу	26
2.5	Кездейсоқ орналастырылған, өзара қиылысатын, бірдей шарлардан тұратын ортаның өткізгіштігінің теориялық және сандық мәнін салыстыру	29
3	Кеуекті ортадағы екі фазалы сұйықтықтың ағымы	32
3.1	Кеуекті ортадағы екі фазалы сұйықтық ағымының математикалық моделі	32
3.2	Жазық каналдағы екі фазалы сұйықтықтың ағынын сандық зерттеу	34
	ҚОРЫТЫНДЫ	38
	ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ	40

КІРІСПЕ

Дипломдық жұмыс кеуекті ортадағы бір және екі фазалы сұйықтық ағымының кеуек шкаласын зерттеуге арналған. Зерттеу геометриясы өте тұрақты емес болуы мүмкін кеуекті ортаның кеуек кеңістігіндегі сығылмайтын, бір және екі фазалы сұйықтықтың ағымын сипаттайтын Навье-Стокс теңдеуін қолдануға негізделген. Бұл тәсіл кеуекті ортадағы сұйықтықтың ағымын ешқандай болжамсыз немесе жеңілдетусіз дәл модельдеуге мүмкіндік береді, осылайша кеуекті ортадағы ағындарды егжей-тегжейлі зерттеуге, сонымен қатар жеңілдетілген теориялық бағалаулар алған макроскопиялық заңдылықтарды растауға немесе жоққа шығаруға мүмкіндік береді. Сонымен қатар, зерттеудің бұл әдісі эксперимент жүргізу материалдық ресурстардың көп шығынын талап ететін немесе физикалық эксперимент жүргізу мүмкін болмайтын көптеген жағдайларда эксперименттік әдістерді алмастыра алады.

Бұл дипломдық жұмыстың мақсаты кеуек кеңістігінің макроскопиялық параметрлерінің кеуек кеңістігінің геометриясына және сұйықтықтың физика-химиялық қасиеттеріне тәуелділігін анықтау үшін кеуек кеңістігінің күрделі геометриясын ескере отырып, кеуекті ортадағы бір және екі фазалы сұйықтықтың ағу кеуектерінің масштабында сандық зерттеу болып табылады.

Мақсатқа жету үшін зерттеудің келесі міндеттері тұжырымдалған:

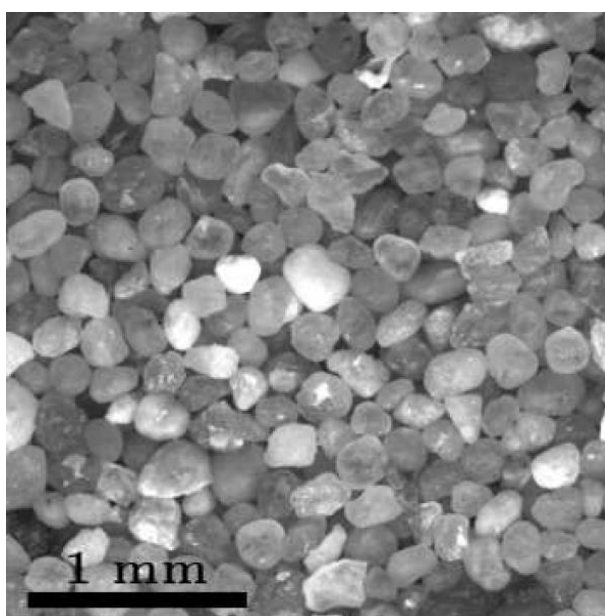
- кеуекті орта микроқұрылымының геометриялық моделін құру және оның геометриялық сипаттамаларын анықтау,
- Навье-Стокс теңдеулері негізінде кеуек кеңістіктегі сұйықтық ағынын зерттеудің сандық әдісін әзірлеу,
- кеуекті ортаның кеуек кеңістігіндегі сұйықтық ағымына егжей-тегжейлі зерттеу жүргізу және ағынның макроскопиялық заңдылықтарын анықтау.

Зерттеу нысаны-геометриясы өте тұрақты емес кеуекті ортаның кеуек кеңістігіндегі бір және екі фазалы сұйықтықтың ағымы.

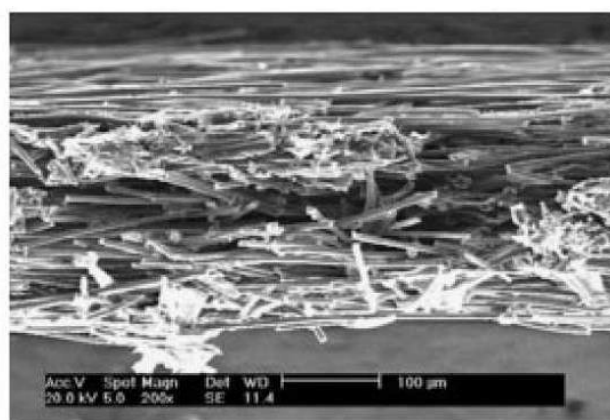
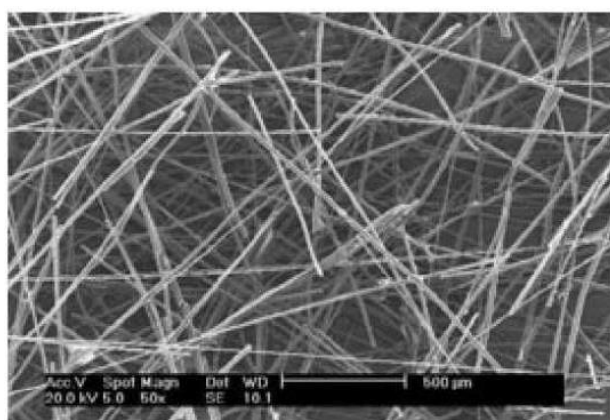
Зерттеу пәні кеуек кеңістігінің микроқұрылымы мен кеуекті ортадағы сұйықтық ағымының макроскопиялық параметрлері арасындағы байланысты орнату болып табылады.

1 Кеукті орта: Сипаттама

Көптеген табиғи, экологиялық және өнеркәсіптік проблемалар кеукті ортадағы сұйықтықтың ағымымен байланысты, сондықтан кеукті ортада болып жатқан процестерді түсіну өте маңызды. Кеукті орта қатты фазадан (қатты қаңқа) және қатты фазалар арасында орналасқан қуыстардан тұрады. Кеукті ортадағы бұл микроскопиялық тесіктер әдетте бір-бірімен байланысады, осылайша сұйықтықтың кеукті орта ішінде ағып кетуіне мүмкіндік береді. Өзара байланысты тері тесігі әдетте кеук кеңістігі деп аталады. Кеукті орта болып табылатын табиғи материалдарға топырақ, тау жыныстары, құмтас және т. б. сияқты материалдар, ал өнеркәсіптік және жасанды материалдар: резеңке, отын элементтері, ядролық реакторға арналған уран өзектері және т. б.



1 – сурет. Кварцты құмнан тұратын кеукті орта



2 – сурет. Топливный элементтің түсірілімі

1 және 2-суреттер сәйкесінше кеуекті орта болып табылатын жасанды және өнеркәсіптік материалды көрсетеді. Кеуекті материалдар ғылым мен техниканың көптеген салаларында қолданылады, мысалы, топырақ пен тау жыныстарының механикасы, мұнай өнеркәсібі, геология, биофизика, материалтану және т.б., сондықтан кеуекті ортадағы сұйықтық ағынын зерттеу өте маңызды. Кеуекті орта кеуектерінің құрылымы және кеуек кеңістігіндегі қатты фаза мен сұйықтықтың физикалық сипаттамалары кеуекті ортадағы сұйықтықтың ағымына қатты әсер етеді. Кеуекті ортаның күрделі геометриясына байланысты ондағы сұйықтықтың ағымын модельдеу өте қиын, мысалы, кеуекті ортаның кейбір жерлерінде өлі тері тесігі, яғни тоқырау аймақтары болуы мүмкін, нәтижесінде сұйықтық ағымының табиғаты әртүрлі болуы мүмкін.

Кеуекті ортадағы сұйықтықтың ағымы масса, қозғалыс мөлшері мен энергияның сақталу заңдарымен сипатталады. Негізінен, Дарси Заңы кеуекті ортадағы сұйықтық ағынын модельдеу үшін қолданылады, ол қысымның төмендеуі мен сүзу жылдамдығы арасында сызықтық байланыс орнатады. Бұл сызықтық байланыс әдетте өткізгіштік коэффициенті деп аталады. Өткізгіштік коэффициенті-бұл макрокопиялық параметр, ол әдетте Навье-Стокс теңдеуі негізінде кеуекті ортадағы сұйықтық ағымының кеуектерін эксперименттік жолмен немесе масштабта модельдеу арқылы өлшенеді. Кеуекті ортадағы сұйықтық ағымының кеуектерін масштабта модельдеу кезінде макрокопиялық модельдеуге қарағанда кеуекті ортаның кеуек кеңістігінің геометриясы ескеріледі, мұнда макрокопиялық модельдеу кезінде қарастырылатын сипаттамалық өлшемдермен салыстырғанда кеуек кеңістігінің құрылымы ескерілмейді.

Кеуекті ортадағы сұйықтық ағымының кеуек шкаласын модельдеудің негізгі міндеті-кеуекті ортаның кеуек геометриясының кеуекті ортаның макрокопиялық параметрлеріне (кеуектілік, өткізгіштік коэффициенті) және ондағы сұйықтықтың ағымына (салыстырмалы фазалық өткізгіштік) әсерін зерттеу. Сондықтан кеуекті ортаның кеуек геометриясы мен макрокопиялық параметрлер арасында байланыс орнату үшін кеуекті ортадағы сұйықтықтың кеуек шкаласын зерттеп, олардың макрокопиялық параметрлерге жалпы әсерін сипаттау қажет. Сонымен қатар, кеуекті ортадағы сұйықтық ағымының кеуек шкаласын модельдеу кеуекті ортаның макрокопиялық параметрлері мен ондағы сұйықтық ағымы арасында байланыс орнатуға мүмкіндік береді. Бұл байланыс кеуекті ортадағы сұйықтық ағымының кеуек шкаласындағы параметрлердің орташа мәні нәтижесінде алынады.

Кеуекті ортаның макрокопиялық параметрлерін және ондағы сұйықтық ағынын бағалау үшін келесі қадамдарды орындау қажет:

- кеуекті ортаның микроқұрылымын математикалық сипаттау,
- кеуекті ортадағы сұйықтықтың ағынын сипаттайтын теңдеулерді дәл немесе шамамен шешіңіз.

Кеуек кеңістігінің күрделі геометриясына байланысты кеуек масштабындағы процестерді модельдеу күрделі міндет болып табылады, бұл кеуекті ортаның геометриялық сипаттамаларын және ондағы сұйықтық

ағымының макроскопиялық параметрлерін есептеудің арнайы әдістерін қажет етеді. Макроскопиялық параметрлерді есептеудің екі әдісі бар: бірінші әдіс модельді жеңілдетуге және теориялық бағалауды табуға негізделген, екінші әдіс кеуекті ортадағы кеуек кеңістігінің күрделі геометриясын ескере отырып, кеуекті ортадағы сұйықтық ағынын сандық модельдеуге негізделген. Бірінші әдіспен кеуекті ортаның қатты фазасы мезгіл-мезгіл немесе кездейсоқ орналастырылған цилиндрлер немесе шарлар түрінде болады. Кеуекті ортаның осындай геометриялық сипаттамасымен макроскопиялық параметрлердің теориялық бағаларын және олардың арасындағы байланысты алуға болады.

Осы модельдердің бірінде кеуекті ортаның қатты фазасы мезгіл-мезгіл орналастырылған цилиндрлер түрінде болады. Мұндай кеуекті ортаны талшықты кеуекті орта деп те атайды. Талшықты кеуекті орта өнеркәсіпте және инженерлік құрылымдарда кеңінен қолданылады, мысалы, жылу алмастырғыштар, сүзгілер, катализаторлар және т.б. талшықты кеуекті ортаның өткізгіштік коэффициентін бағалаудың алғашқы нәтижелері эксперименттік жұмыста және теориялық жұмыстарда келтірілген. Талшықты кеуекті ортаның цилиндрлерінің осьтері бойындағы токтар темекі сүзгілері арқылы, өсімдіктердің сабақтарында және жылу алмасу резервуарларындағы құбырлардың айналасында идеализацияланған токтар болып табылады. Цилиндрлердің осьтеріне перпендикуляр ағымды зерттеу нәтижелерін суды немесе газдарды тазартуға арналған сүзгілерді жасау кезінде қолдануға болады. Бұл жүйелердің өткізгіштігін есептеудің эксперименттік жұмыстарына толық шолуды әдебиеттерден табуға болады. Кейін бір-біріне параллель орналасқан цилиндрлер үшін талшықты кеуекті ортаның өткізгіштігінің аналитикалық және сандық мәні алынды. Бұл шешім кеуектіліктің өте кіші және үлкен мәндеріне ғана дәл келеді.

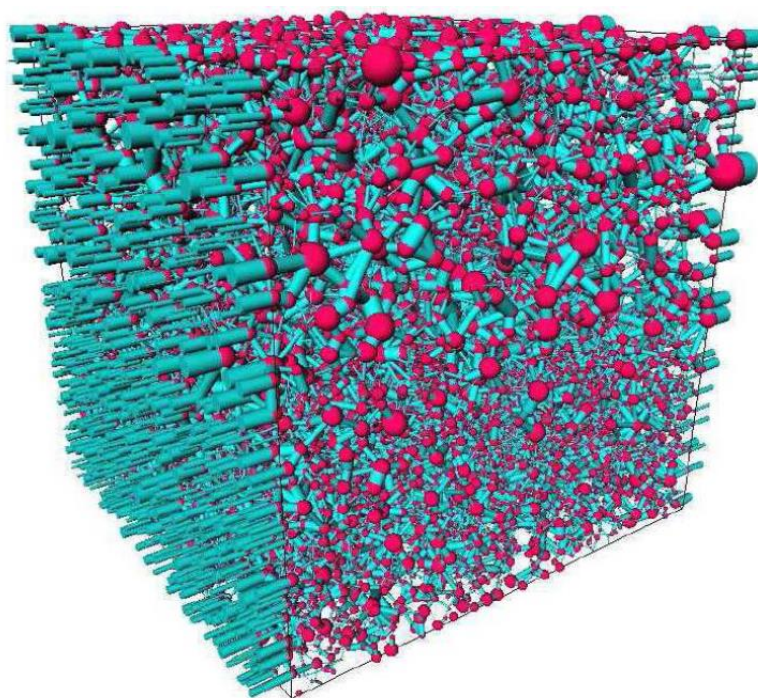
Басқа модельдерде кеуекті ортаның қатты фазасы мезгіл-мезгіл орналастырылған шарлар түрінде болады. Мұндай модельдерде Инерция күшінің (Навье-Стокс теңдеуіндегі инерциялық мүшелер) Рейнольдстың аз саны бар кеуекті ортадағы сұйықтықтың ағымына әсері ерекше қызығушылық тудырады, бірақ мұндай токтарды теориялық тұрғыдан зерттеу өте қиын, тіпті жұмыста көрсетілгендей бір доп үшін. Шарлардың көлемдік үлесі мен Рейнольдс саны нөлге жеткенде, біз сұйықтықтың тұтқыр ағынын инерциялық күштердің әсерінсіз бір допқа айналдырамыз. Рейнольдс санының аздығымен Озеенді түзетуді қолдана отырып, инерциялық күштердің әсерін ескеруге болады. Мұндай ағым әдебиетте егжей-тегжейлі зерттелген. Рейнольдс саны нөлге ұмтылған жағдай, яғни инерциялық күштер шамалы, ал мерзімді түрде орналастырылған шарлардың көлемдік үлесінің аз мәні әдебиеттерде қарастырылады. Сонымен, Рейнольдс санының аз мәні мен шарлардың көлемдік үлесі бар мезгіл - мезгіл немесе кездейсоқ орналастырылған шарлардан тұратын ортадағы сұйықтықтың ағымы әдебиеттерде зерттелген.

Нақты кеуекті ортадағы сұйықтықтың ағымы ерекше қызығушылық тудырады. Алайда, мұндай ортадағы сұйықтық ағынын модельдеу кезінде

қиындық туындайды, өйткені мұндай ортада кеуек кеңістігінің геометриясы өте тұрақты емес және модельдеу үшін алдымен кеуекті ортаның кеуек кеңістігінің геометриясын анықтау керек, яғни кеуекті ортаның микроқұрылымын математикалық түрде сипаттау. Кеуек кеңістігінің Өлшемдері бірнеше сантиметрден бірнеше микрометрге дейінгі мәндерді қабылдауы мүмкін болғандықтан, модельдеу кезінде тері тесігінің барлық масштабын ескеру қажет, ол үшін сұйықтықтың ағымы микро-масштапта және макро-масштапта бөлек модельденеді. Тағы бір қиындық микро масштабтағы кеуек кеңістігінің геометриясын анықтаумен байланысты. Микро масштабтағы кеуек кеңістігінің өлшемдері микрометрмен өлшенетіндіктен, мұндай өлшемдердің тесіктерін анықтау өте қиын. Алайда, көптеген жағдайларда кеуекті ортадағы сұйықтық ағымының параметрлерін, әсіресе ортаның кеуек кеңістігінің геометриясын микро масштабта дәл анықтаудың қажеті жоқ, бірақ ортаның макроскопиялық параметрлері арасындағы байланысты анықтау жеткілікті. Көптеген кеуекті орталарда (мысалы, құмтастарда, саздарда және т.б.) кеуекті ортаның қатты фазаларының позициялары мен формалары кездейсоқ болып табылады, сондықтан микро-масштапта кеуекті ортаны біртекті (біртекті) және изотропты (яғни қатты фазалар кездейсоқ бағытталған орта) деп елестетуге болады. Біртекті және изотропты орта үшін өткізгіштіктің кеуектілікке тәуелділігінің алғашқы теориялық бағалары еңбектерінде алынды. Бұл жұмыстарда кеуекті орта бірдей, кездейсоқ орналастырылған, өзара қиылысатын шарлар түрінде ұсынылған. Әрі қарай, бұл бағалау кеуекті ортаның микроқұрылымын егжей - тегжейлі сипаттай отырып, жұмыстарында жақсарды. Бұл жұмыстар туралы толығырақ осы жұмыстың 2 және 3-бөлімдерінде сипатталады. Көріп отырғанымыздай, біртекті және изотропты орта үшін өткізгіштіктің кеуектілікке тәуелділігін теориялық бағалау бойынша көптеген жұмыстар бар және осы тақырыптағы мақалаларды жариялау хронологиясына сүйене отырып, бұл зерттеу әлі де жалғасуда, осылайша осы зерттеудің маңыздылығын түсіндіреді. Изотропты ортадан басқа анизотропты орталар да бар (мысалы, әктастар, доломиттер және т.б.), яғни қатты фазалар кездейсоқ бағытталмаған, бірақ белгілі бір бағытқа ие орта. Мұндай орта үшін осы ортаны сипаттайтын жаңа математикалық модельдер қажет, сондықтан мұндай орта үшін өткізгіштіктің кеуектілікке тәуелділігі біртекті және изотропты ортадан мүлдем өзгеше болуы мүмкін. Бұл жұмыста тек біртекті және изотропты орта қарастырылады.

Кеуекті ортаның қатты фазасын шарлар түрінде немесе геометриялық фигуралардың басқа түрлері түрінде көрсетуден басқа, кеуекті орта әлі де кеуектер мен арналар жүйесі (ӨКК немесе PNM – Pore-Network Model) түрінде ұсынылған. Бұл жеңілдету кеуек кеңістігінің геометриясын идеализациялау және қарапайым фигуралар түрінде ұсыну үшін жасалады, мысалы, кеуектерді сфералар түрінде, ал кеуектерді байланыстыратын арналарды цилиндрлер түрінде ұсынуға болады (3-сурет). Мұндай кеуек кеңістіктегі сұйықтықтың ағымы оңай сипатталады, мысалы, цилиндрлер

болып табылатын арналардағы ағынды Пуазейл Заңымен сипаттауға болады. Жалғыз қиындық сфералар болып табылатын тері тесіктеріндегі сұйықтық ағынын сипаттауда жатыр, бірақ бұл мәселені тері тесігі сферадан гөрі күрделі болған жағдайда да шешуге болады. Берілген, жеңілдетілген модель барлық арналар мен тесіктердегі сұйықтық ағымының параметрлерін табуға, содан кейін осы параметрлерді кеуекті ортаның бүкіл көлеміне орташалаңдыра отырып, кеуекті орта мен ондағы сұйықтықтың макроскопиялық параметрлерін анықтауға арналған. Әдетте, бұл модель кеуекті ортадағы сұйықтық ағымының кеуек шкаласындағы басқа модельдерге қарағанда аз есептеу ресурстарын қажет етеді, бірақ бұл модель кеуек кеңістігінің геометриясын дәл сипаттамайды, нәтижесінде макроскопиялық параметрлердің мәні өте дәл болмайды, өйткені макроскопиялық параметрлер тек ортаның кеуектілігіне ғана емес, сонымен қатар кеуекті ортаның қатты фазаларының бетіне де байланысты. Дегенмен, соңғы уақытта кеуек кеңістігінің күрделі геометриясын дәл сипаттауға мүмкіндік беретін заманауи модельдер пайда болды. Осы модельді қолдана отырып, кеуекті ортадағы бір және екі фазалы сұйықтықтың ағымын зерттеуге, қатты дененің бетіне сұйықтықтың сулануының әсерін зерттеуге және т.б., сондай-ақ салыстырмалы фазалық өткізгіштігі, қалдық қанықтылығы және т. б. сияқты макроскопиялық параметрлерді есептеуге болады.



3 – сурет. Кеуекті ортаның кеуек және канал түрінде қарастыру

Аталған жұмыстардан көріп отырғанымыздай, макроскопиялық параметрлердің кеуекті ортаның геометриялық сипаттамасына және сұйықтықтың физика-химиялық қасиеттеріне тәуелділігін теориялық зерттеу кеуекті ортадағы сұйықтық ағынын модельдеу үшін өте маңызды, алайда

көптеген еңбектерде бағалау кезінде кейбір жеңілдетулер мен болжамдар жасалды және олардың дұрыстығын немесе жеткіліктілігін растау немесе жоққа шығару үшін кеуек масштабында зерттеу қажет. кеуекті ортадағы сұйықтықтың ағымы. Соңғы уақытта есептеу құрылғыларының қуаты едәуір артып, нәтижесінде кеуекті ортадағы сұйықтық ағымының кеуек шкаласында зерттеудің жаңа, заманауи, тиімді сандық әдістері пайда болды, сонымен қатар кеуекті ортаның үш өлшемді құрылымын 1 микрометр ажыратымдылығымен алуға болатын жоғары ажыратымдылықтағы кескіндерді алудың заманауи технологияларының арқасында кеуекті ортадағы сұйықтықтың ағымының кеуек шкаласында егжей-тегжейлі зерттеу мүмкіндігі пайда болды. Кеуекті ортадағы сұйықтық ағымының кеуек шкаласында көптеген зерттеу әдістері бар, мысалы: Больцман тор теңдеулері әдісі (Lattice Boltzmann әдісі), тегістелген бөлшектердің гидродинамикасы әдісі (Smoothed-particle hydrodynamics), торлы әдістер, мысалы: ақырлы айырмашылық әдісі, ақырлы элементтер әдісі, бақылау көлемі әдісі және т.б..

Больцман тор теңдеулері әдісі тор әдістеріне жатады, бірақ, мысалы, ақырлы айырмашылық әдісінен айырмашылығы, бұл әдіс Навье-Стокс теңдеулерін шешпейді, керісінше тор түйіндеріндегі (немесе тордағы) бөлшектердің қозғалысы мен соқтығысуын бақылайды. Больцман тор теңдеулері әдісінің негізгі идеясы микро масштабта, соның ішінде кеуекті ортаның кеуек кеңістігінде болатын негізгі физикалық процестерді немесе құбылыстарды сипаттайтын жеңілдетілген кинетикалық теңдеулерді құру болып табылады. Больцман тор теңдеулері әдісінің басқа тор әдістерімен салыстырғанда артықшылығы, мысалы, бақылау көлемі әдісі-бұл әдісті күрделі геометриясы бар аудандар үшін оңай қолдану, сонымен қатар есептеу процесін тездету үшін бұл әдіс оңай параллельденеді. Алайда, бұл әдістің кемшіліктері де бар және негізгі кемшіліктердің бірі-Навье-Стокс теңдеуін сандық шешуге негізделген тор әдістеріндегідей тең дәлдікпен кеуекті ортадағы сұйықтық ағынын модельдеу үшін көптеген бөлшектер қажет.

Сондай-ақ, бөлшектердің қозғалысын модельдеуге негізделген әдістердің арасында тегістелген бөлшектердің гидродинамикасы әдісін ажыратуға болады. Тегістелген бөлшектердің гидродинамикасы әдісі, Больцман торлы теңдеулер әдісінен айырмашылығы, тор емес әдістерге жатады, онда сұйықтық көлемі бөлшектер деп аталатын дискретті элементтерге бөлінеді, содан кейін сұйықтықтың әр элементінің қозғалысын және олардың өзара әрекеттесуін Навье-Стокс теңдеуімен модельдейді. Бұл әдіс лагранг әдісі деп те аталады, өйткені координаттар сұйықтықпен бірге қозғалады. Бұл әдіс сұйықтықтың әр элементінің қозғалысын зерттейтіндіктен, бұл булану, конденсация, кавитация және т.б. сияқты бір және екі фазалы сұйықтықтың ағымында болатын күрделі құбылыстарды зерттеуге мүмкіндік береді, сонымен қатар бұл әдіс тор әдістерімен бірге бір және екі фазалы сұйықтықтың фазалық бетінің қозғалысын зерттеуге мүмкіндік береді. қатты бет. Тор әдістерімен салыстырғанда HCG-нің басты кемшілігі-кеуекті ортадағы сұйықтық ағынын тор әдістеріндегідей эквивалентті дәлдікпен модельдеу үшін көптеген бөлшектер қажет.

Кеуекті ортадағы сұйықтық ағынын модельдеу үшін есептеу торының түйіндеріндегі Навье-Стокс теңдеулерін жақындататын ақырлы айырмашылық әдісі, ақырлы элементтер әдісі және бақылау көлемінің әдісі сияқты дәстүрлі сандық әдістерді қолдануға болады. Кеуекті ортадағы сұйықтықтың ағымын зерттеу үшін осы әдістерді қолданатын көптеген жұмыстардың болмауының басты себебі-мұндай есептелген торды кеуек кеңістігінің геометриясымен үйлестіру үшін таңдау керек, бірақ оның өте тұрақты емес құрылымына байланысты оны жасау өте қиын, кейде мүмкін емес. Жұмысында Больцман тор теңдеулері әдісін соңғы элементтер әдістерімен және сығылмайтын, ламинарлы сұйықтық ағымына арналған бақылау көлемімен салыстыру көрсетілген. Сұйықтықтың стационарлық емес ағымы жағдайында Больцман торының теңдеулерін есептеу нәтижелері ақырғы элементтер әдісін немесе бақылау көлемін есептеу нәтижелерімен дәл сәйкес келеді, алайда тұрақты ток жағдайында ақырғы элементтер әдісін немесе бақылау көлемін қолдана отырып, конвергенциялау туралы шешім тезірек болады. нәтижелер Больцман торының теңдеулер әдісіне қарағанда дәлірек болады. Алайда, көп жағдайда кеуекті ортадағы сұйықтық ағымы баяу және ламинарлы болады. Дегенмен, жақында тиімді әдістер пайда болды, олар құрылымдық тордағы Навье-Стокс теңдеулерін сандық түрде шешеді және алынған шешімдер ақырлы элементтер немесе Бақылау көлемі әдісімен алынған шешімдермен дәл сәйкес келеді. Бұл әдістер құрылымдалған тордағы Навье-Стокс теңдеулерін дәл шешетіндіктен, бұл әдістерді кеуекті ортадағы сұйықтық ағынын модельдеу үшін де қолдануға болады, өйткені құрылымдық тордағы кеуек кеңістігінің күрделі геометриясын сипаттау құрылымдық емес торға қарағанда әлдеқайда оңай. Бұл әдістер ақырлы айырмашылық әдістерімен бірдей, өйткені ақырлы айырмашылық әдісіндегідей, бұл әдістер Тейлор сериясындағы ыдырауды қолдана отырып, құрылымдалған тор түйіндеріндегі Навье-Стокс теңдеулерін жақындатады. Сондықтан, осы диссертациялық жұмыста кеуекті ортадағы бір және екі фазалы сұйықтықтың ағымын сандық зерттеу үшін құрылымдалған тордағы соңғы айырмашылық әдісі қолданылады.

1.1 Кеуекті ортаның геометриялық түсініктемесі

Бұл бөлімде кеуекті ортаның микроқұрылымының математикалық сипаттамасы және бірдей, кездейсоқ орналастырылған, өзара қиылысатын шарлардан тұратын кеуекті ортаның қатты фазасының кеуектілігі мен бетінің ауданын теориялық бағалау берілген. Содан кейін жоғарыда аталған ортаның қатты фазасының кеуектілігі мен бетінің ауданын анықтаудың сандық әдісінің сипаттамасы келтірілген және бөлімнің соңында кеуектіліктің теориялық және сандық мәні мен қатты фазаның беткі ауданын салыстыру келтірілген.

1.2 Кеуекті ортаны анықтау

Әдетте, ортаның макрокопиялық параметрлері мен оның микроқұрылымы арасындағы байланыс статистикалық механикада зерттеледі. Негізінен, статистикалық механика зат күйінің макрокопиялық параметрлері мен оның микроқұрылымы арасындағы байланысты зерттейді, мұнда микроқұрылым термині молекулалардың орналасуы мен қозғалысына қатысты. Алайда, микроқұрылым термині молекулалық масштабқа қарағанда әлдеқайда үлкен, бірақ қарастырылып отырған ортаның мөлшерінен әлдеқайда аз болуы мүмкін. Мысалы, кеуекті ортаның кеуек кеңістігі кеуекті ортаның микроқұрылымын білдіруі мүмкін. Бұл бөлімде кеуекті ортаның микроқұрылымының математикалық сипаттамасы беріледі.

Көлемнің кеуекті ортасы екі суббластан тұратын аймақ түрінде ұсынылады: көлемдік лобы бар қуыстар аймағы (немесе кеуек кеңістігі) және көлемдік лобы бар қатты фаза аймағы. Кеуекті ортаның микроқұрылымын математикалық сипаттау үшін кеуекті ортаның микроқұрылымын сипаттайтын айнымалы енгіземіз:

$$I(x) = \begin{cases} 1, & \text{если } x \in D_0 \\ 0, & \text{иначе} \end{cases}$$

Егер функция $I(x)$ аймақтың барлық нүктелеріне белгілі болса, онда кеуекті ортаның кеуек кеңістігінің геометриясы осы функциямен толық сипатталады. Алайда, кеуекті ортаның микроқұрылымының өлшемдері кеуекті ортаның өлшемдерімен салыстырғанда өте аз болғандықтан және кеуекті ортаның қатты фазалары кездейсоқ орналасқандықтан, функцияны анықтау мүмкін емес. Алайда, егер функцияны кеуекті орта көлемінде орташа алсақ, онда біз ортаның кеуектілігі мәнін аламыз. Ол үшін ықтималдылықты бөлудің нүктелік функциясын енгізіңіз:

$$S_{\varepsilon_1 \varepsilon_2 \dots \varepsilon_n}(x_1, x_2, \dots, x_n) = P[I(x_1) = \varepsilon_1, I(x_2) = \varepsilon_2, \dots, I(x_n) = \varepsilon_n]$$

2 Кеуекті ортадағы бір фазалы сұйықтықты ағымы

Бұл бөлімде кеуекті ортадағы бір фазалы сұйықтықтың ағымы зерттеледі. Сандық зерттеу әдісіне сүйене отырып, кездейсоқ орналастырылған, өзара қиылысатын, бірдей шарлардан тұратын кеуекті ортаның макрокопиялық параметрлері табылды және бұл сандық мәндер белгілі теориялық бағалаулармен салыстырылды. Кеуекті ортаның өткізгіштігін оның кеуектілігімен және қатты фазаның беткі аймағымен байланыстыратын Козен-қалта теңдеуі кеуектілік мәні нөлге жақын болған кезде немесе бірлікке жақын болған кезде қоспағанда, барлық дерлік кеуектілік мәндеріндегі сандық мәндерге жақсы сәйкес келетіні белгілі болды. Сондай-ақ, өткізгіштігі нөлге айналатын осы кеуекті орта үшін кеуектіліктің критикалық мәні табылды.

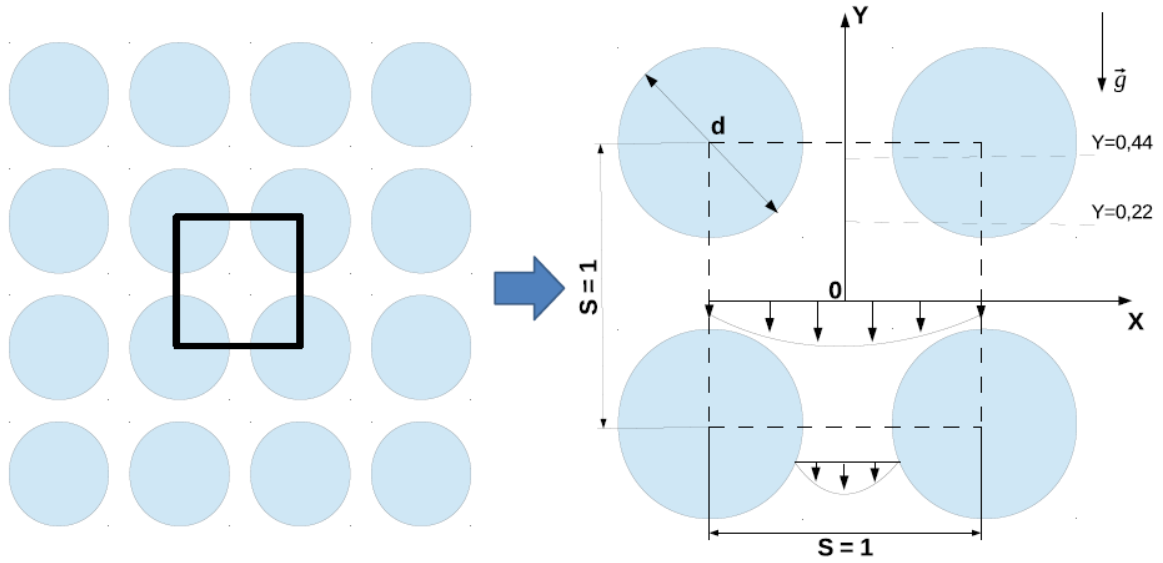
2.1 Бірдей, бір-біріне параллель, мезгіл-мезгіл орналасқан цилиндрлерден тұратын ортаның өткізгіштігін теориялық бағалау

Талшықты кеуекті орта өнеркәсіпте және инженерлік құрылымдарда кеңінен қолданылады, мысалы: жылу алмастырғыштар, сүзгілер, катализаторлар, отын элементтерінің электродтары. Талшықты кеуекті орта үшін негізгі техникалық мәселе-бұл ортадағы сұйықтықтың ағу жылдамдығын анықтау. Талшықты кеуекті ортадағы сұйықтықтың ағу жылдамдығын біле отырып, ортаның маңызды техникалық сипаттамаларын анықтауға болады, мысалы, қоршаған орта температурасының өзгеру жылдамдығы, зат концентрациясы және т. б. Көп жағдайда талшықты кеуекті ортадағы ток өте баяу жүреді және Дарси заңына бағынады, жылдамдық пен қысымды келесі тәуелділікпен байланыстырады:

$$\vec{u}_d = \frac{K}{\mu} \nabla(p + \rho g z)$$

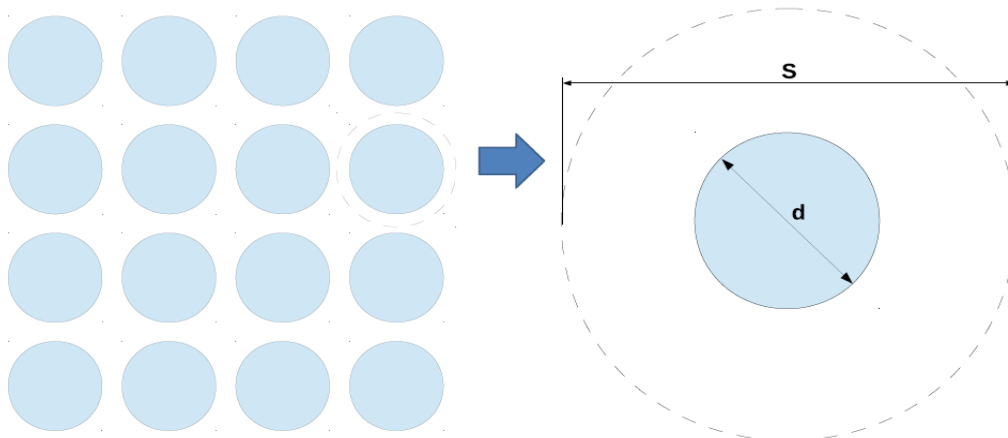
Мұндағы K -кеуекті ортаның өткізгіштігі, μ - сұйықтықтың тұтқырлығы, - сүзу жылдамдығы, - кеуекті ортадағы қысым және-гидростатикалық қысым. (3.1) формулада ағынның барлық параметрлері (жылдамдық, қысым) кеуекті орта көлемінде орташа болады. Жалпы алғанда, сүзу жылдамдығының қысымның төмендеуіне сызықтық тәуелділігі әрдайым орындалмайды. Жұмыста көрсетілгендей, егер кеуекті орта гомогенді және изотропты болса, сондай-ақ осы ортадағы сұйықтықтың ағымы Стокс теңдеуімен сипатталса, көрсетілген тәуелділік әрдайым сызықты болады (яғни. Егер сіз Навье-Стокс теңдеуіндегі конвективті мүшелерді елемейтін болсаңыз). (3.1) формуласын қолдана отырып, кеуекті ортадағы сұйықтықтың ағу жылдамдығын есептеудің негізгі проблемасы-ортаның өткізгіштік коэффициентін анықтау . Жалпы айтқанда, кеуекті ортаның өткізгіштік коэффициентін анықтау қиын міндет болып табылады және ол кеуекті ортаның әр түрлі геометриясы үшін әр түрлі болады, яғни қатты фазаның беткі пішініне байланысты, мысалы, квадрат түрінде көлденең қимасы бар цилиндрдің айналасында өтетін сұйықтықтың кедергісі дөңгелек қимасы бар цилиндрдің айналасынан үлкен болады. Негізінен, кеуекті ортаның өткізгіштік коэффициенті эмпирикалық жолмен анықталады, сұйықтықтың ағуын және қысымның төмендеуін біле отырып, формуладан (3.1) кеуекті ортаның өткізгіштігін анықтауға болады . Алайда, көптеген инженерлік құрылымдарда кеуекті ортаның геометриясы өте қарапайым, сонымен қатар көптеген инженерлік есептеулерде кеуекті ортадағы сұйықтық ағымының параметрлерін дәл есептеу қажет емес (мысалы, жылдамдық өрісі), бірақ олардың орташа мәндерін есептеу

жеткілікті.



4 – сурет. Кеукті орта

Бұл жұмыста периодты құрылымы бар талшықты кеукті орта қарастырылады (сол жақтағы 32-суретте). Талшықты кеукті орта бірдей радиустың цилиндрлері мезгіл-мезгіл және бір-біріне параллель орналасқан аймақ түрінде ұсынылады. Цилиндрлер мерзімді түрде орналасқандықтан, мұндай кеукті ортаны біртекті етіп қоюға болады. Жалпы алғанда, мұндай кеукті ортада ағынның екі бағыты бар: цилиндрлер бойымен және бойымен. Бұл жұмыста тек цилиндрлердің айналасындағы жазық ток, яғни цилиндрлердің осьтеріне перпендикуляр жазықтықтағы ток қарастырылды. Бұл цилиндрлер бір-бірінен екі бағытта бірдей қашықтықта орналасқандықтан және цилиндрлердің радиусы бірдей болғандықтан, мұндай кеукті ортаны изотропты етіп қоюға болады.



5 – сурет. Кеукті орта

Көрсетілген кеукті ортаның өткізгіштік коэффициентінің мәнін теориялық бағалау бойынша көптеген жұмыстар бар. Талшықты кеукті ортаның өткізгіштік коэффициентінің мәнін теориялық бағалаудың алғашқы жұмыстарынан John Happel (1959) және Nasimoto (1959) жұмыстарын ажыратуға болады. John Appel [13, p.176] кейбір болжамдарды қолдана отырып, цилиндрлік координат жүйелеріндегі (оң жақтағы 33-суретте) талшықты кеукті ортадағы сұйықтықтың ағымы үшін Стокс теңдеуін шешу арқылы теориялық бағалауды тапты. Оның талшықты кеукті ортаның өткізгіштік коэффициентін теориялық бағалауы келесідей:

$$K_1^* = \frac{K_1}{D^2} = \frac{1}{32\psi} \left[\ln\left(\frac{1}{\psi}\right) - \frac{1-\psi^2}{1+\psi^2} \right]$$

Талшықты кеукті ортаның өткізгіштік коэффициентін теориялық бағалау келесідей:

$$K_2^* = \frac{K_2}{D^2} = \frac{1}{32\varphi} \left[\ln\left(\frac{1}{\varphi}\right) - 1,476 \right]$$

Теоретическая оценка коэффициента проницаемости волокнистой пористой среды выглядит следующим образом:

$$K_3^* = \frac{K_3}{D^2} = \frac{1}{32\varphi} \left[\ln\left(\frac{1}{\varphi}\right) - 1,476 + 2\varphi - 1,774\varphi^2 + 4,076\varphi^3 \right]$$

Талшықты кеукті ортаның өткізгіштік коэффициентінің мәнін теориялық бағалау бойынша кейінгі жұмыстардың ішінен Тамайол мен Бахрамидің (2008) жұмысын бөліп көрсетуге болады. Тамайол мен Бахрамидің жұмысы шексіз, мезгіл-мезгіл орналастырылған цилиндрлердің орнына төрт цилиндрден тұратын квадрат ұяшықты қарастырады және талшықты кеукті ортаның өткізгіштік коэффициентін есептеу үшін параболалық жылдамдық профилін қарастырады. Талшықты кеукті ортаның өткізгіштік коэффициентін теориялық бағалау келесідей:

$$K_4^* = \frac{K_4}{D^2} = \frac{1}{3\varphi^2} \frac{(1-\varphi)^{\frac{5}{2}}}{\left(2(\varphi+2) + 4 \frac{(1-\sqrt{\varphi})(1-\varphi)^2}{\sqrt{\varphi}} \right) \frac{\sqrt{1-\varphi}}{\sqrt{\varphi}} + 12 \arctan\left(\frac{1+\sqrt{\varphi}}{\sqrt{1-\varphi}} \right)}$$

2.2 Бірдей, мезгіл-мезгіл орналастырылған шарлардан тұратын ортаның өткізгіштігін теориялық бағалау

Мұнда бірдей, мезгіл-мезгіл орналастырылған шарлардан тұратын кеукеті орта қарастырылады. Бұл шарлар мерзімді түрде орналасқандықтан, мұндай кеукеті ортаны біртекті деп санауға болады] және бұл шарлар барлық үш бағытта бірдей қашықтықта орналасқандықтан, мұндай кеукеті ортаны изотропты деп санауға болады. Аталған кеукеті ортаны теориялық бағалау бойынша жұмыстардың ішінде Hashimoto (1959) [12, p.321] және Sangani-Acrivos (1982) жұмыстарын бөліп көрсетуге болады. Hashimoto жұмысында [12, p.321] бағалау үшін Стокс теңдеуінің нақты шешімі шексіз қатар түрінде қолданылады. Өткізгіштік коэффициентін теориялық бағалау:

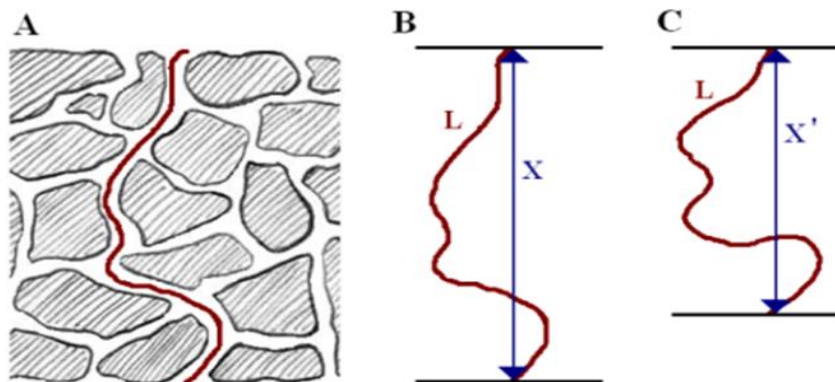
$$K^* = 1 - 1,7601\varphi^{1/3} + \varphi - 1,5593\varphi^2 + O(\varphi^{8/3})$$

Sangani-Acrivos жұмысында Hashimoto бағалауы нақтыланды шешімнің жоғары тәртібінің мүшелерін қолдана отырып. Өткізгіштік коэффициентін теориялық бағалау:

$$K^* = 1 - 1,7601\varphi^{1/3} + \varphi - 1,5593\varphi^2 + 3,9799\varphi^{8/3} - 3,0734\varphi^{10/3} + O(\varphi^{11/3})$$

2.3 Көптеген кездейсоқ орналасқан, өзара қиылысатын, бірдей шарлардан тұратын ортаның өткізгіштігін теориялық бағалау

Алдыңғы бөлімдерде қарапайым кеукеті орта үшін өткізгіштіктің теориялық бағалаулары табылды және бұл есептеулер кеукеті орта құрылымын және оның сұйықтық ағымына әсерін егжей-тегжейлі зерттемей, осы кеукеті орта арқылы сұйықтықтың қысымы мен сүзу жылдамдығының арасындағы сызықтық байланыс арқылы алынды. Алайда, күрделі құрылымы бар кеукеті ортаның өткізгіштігін бағалауды табу үшін кеукеті ортаның құрылымын егжей-тегжейлі зерттеу қажет.



6 – сурет. Кеукеті ортаның кеукет каналының орамдылығы

Кеукеті ортаның өткізгіштік қасиеті оның кеукеті ортаның геометриялық сипаттамасы болып табылатын кеукетілік, қатты фазаның

беткі ауданы, бұралу және т.б. сияқты басқа қасиеттеріне байланысты екендігі интуитивті түрде түсінікті. Кеуекті ортаның өткізгіштігі мен басқа қасиеттері арасындағы байланысты орнатудың бір әдісі-эмпирикалық заңдылықтарды құру. Өткізгіштіктің ортаның кеуектілігіне байланысты екендігі айқын, бірақ мұндай тікелей байланыс жоқ екендігі интуитивті, өйткені кеуектілік мәні бірдей екі түрлі кеуекті ортаны таңдауға болады, бірақ олардың өткізгіштігі әртүрлі болады. Өткізгіштік пен кеуекті ортаның басқа қасиеттері арасында байланыс орнататын көптеген эмпирикалық заңдылықтар бар, олардың ішінде Козен-қалта формуласын бөліп көрсетуге болады, ол көбінесе өткізгіштік пен кеуекті ортаның басқа қасиеттері арасында байланыс орнатады және келесі түрде жазылады:

$$K = \frac{\phi^3}{T^2 s^2}$$

Бұл байланыс кеуекті ортаның әртүрлі кеуек каналдарындағы сұйықтық ағынын зерттеуден алынды. Егер кеуек арналарын бірдей көлденең қималары бар түзу цилиндрлер түрінде қарастыратын болсақ, онда Козен-қалта теңдеуі келесі формада болады:

$$K = \frac{\phi^3}{6s^2}$$

Сондай-ақ, белгілі бір кеуекті орта үшін теориялық бағалау бар. Осы жұмыста қарастырылған белгілі бір кеуекті орталардың бір мысалы-кездейсоқ орналастырылған, бір-бірімен қиылыспайтын, бірдей шарлардан тұратын кеуекті орта. Көрсетілген кеуекті ортаның өткізгіштігін бағалау арасында Теориялық бағалауды бөлуге болады Бринкман. Бұл бағалау шарлардың көлемдік үлесінің кіші мәндері үшін ғана жарамды және келесі түрге ие:

$$\frac{K}{R^2} = \frac{1}{6\pi R^3 N} \left(1 + \frac{3\eta}{4} \left(1 - \sqrt{\frac{8}{\eta} - 3} \right) \right)$$

Көрсетілген кеуекті ортаның өткізгіштігін бағалаудың ішінде Weissberg-Prager (1970) теориялық бағасын бөліп көрсетуге болады, ол өткізгіштіктің максималды мәнін кеуектілікпен байланыстырады (яғни, осындай кеуекті орта үшін өткізгіштіктің жоғарғы мәні табылған). Бұл бағалау диссипация энергиясының өзгеруіне байланысты алынды және келесі түрде жазылады:

$$\frac{K}{R^2} \leq \frac{\phi}{6\pi R^3 N}$$

Бұл бағалауды табу үшін кеуекті ортада қатты фазаны табу ықтималдығын бөлудің бір нүктелі функциясы ғана қолданылды, яғни бұл бағалау кеуек арналарының пішінін ескермейді, сондықтан бұл бағалауды қолайлы деп санауға болмайды, бірақ бұл бағалау кеуекті ортаның өткізгіштігінің максималды рұқсат етілген мәнін анықтау үшін пайдалы. Кеуекті ортада қатты фазаның болу ықтималдығын бөлудің екі немесе одан да көп нүктелік функцияларын қолданатын теориялық бағалаулар бар, олар кеуекті ортаның құрылымын егжей-тегжейлі ескереді, бірақ бұл жұмыста бұл бағалау қарастырылмаған.

2.4 Тұтқыр сығылмайтын сұйықтық үшін Навье-Стокс теңдеуін шешудің сандық әдістеріне шолу

Әрі қарай бөлімде тұтқыр, сығылмайтын сұйықтық үшін Навье-Стокс теңдеуінің сандық шешіміне негізделген кеуекті ортадағы бір фазалы сұйықтықтың ағынын сандық зерттеу берілген:

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) + F_x \\ \rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) + F_y \\ \rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) + F_z \\ \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \end{array} \right.$$

Жазық ток үшін теңдеу келесі формада болады:

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + F_x \\ \rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + F_y \\ \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \end{array} \right.$$

Теңдеулерді сандық шешудің негізгі күрделілігі жылдамдық пен қысым үшін шекаралық шарттарды белгілеу болып табылады. Жазық есепте (3.13) теңдеу айнымалы ток функциясы () деп жазылған жақсы. Содан кейін (3.13) теңдеу келесі түрде жазылады:

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho \left(\frac{\partial \omega}{\partial t} + u \frac{\partial \omega}{\partial x} + v \frac{\partial \omega}{\partial y} \right) = \mu \left(\frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2} \right) \\ \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} = \omega \\ \frac{\partial u}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial x} = \omega \\ u = \frac{\partial \psi}{\partial y}, \quad v = -\frac{\partial \psi}{\partial x} \end{array} \right.$$

Теңдеудің (3.14) теңдеумен (3.13) салыстырғанда артықшылығы - (3.14) теңдеуге қысым мен шекаралық жағдайлар анық кірмейді және жылдамдық үшін шекаралық жағдайдан оңай шығады. Алайда, көптеген есептерде жылдамдық-қысым айнымалыларында (3.12 немесе 3.13) теңдеуді шешу керек, мысалы, үш өлшемді есепті қарастыру кезінде немесе екі фазалы сұйықтықтың ағынын зерттеу кезінде, оның интерфейсінде беттік керілу күштерін ескеру қажет және т. б. Шекарада тек жылдамдық шарттары қойылған токтарды қарастыру жеткілікті болған жағдайда, теңдеулерді (3.12, 3.13) аралық тордағы проекция әдісімен шешу өте ыңғайлы. Бұл әдіспен (3.12 немесе 3.13) теңдеу екі кезеңде шешіледі. Бірінші кезеңде олар қысымды ескерместен жылдамдықтың аралық мәнін табады:

$$\rho \left(\frac{\vec{u}^* - \vec{u}^n}{\Delta t} + (\vec{u}^n \cdot \nabla) \vec{u}^n \right) = \mu \Delta \vec{u}^n$$

Екіншісінде жылдамдықты келесі сәтте табыңыз:

$$\rho \frac{\vec{u}^{n+1} - \vec{u}^*}{\Delta t} = -\nabla p$$

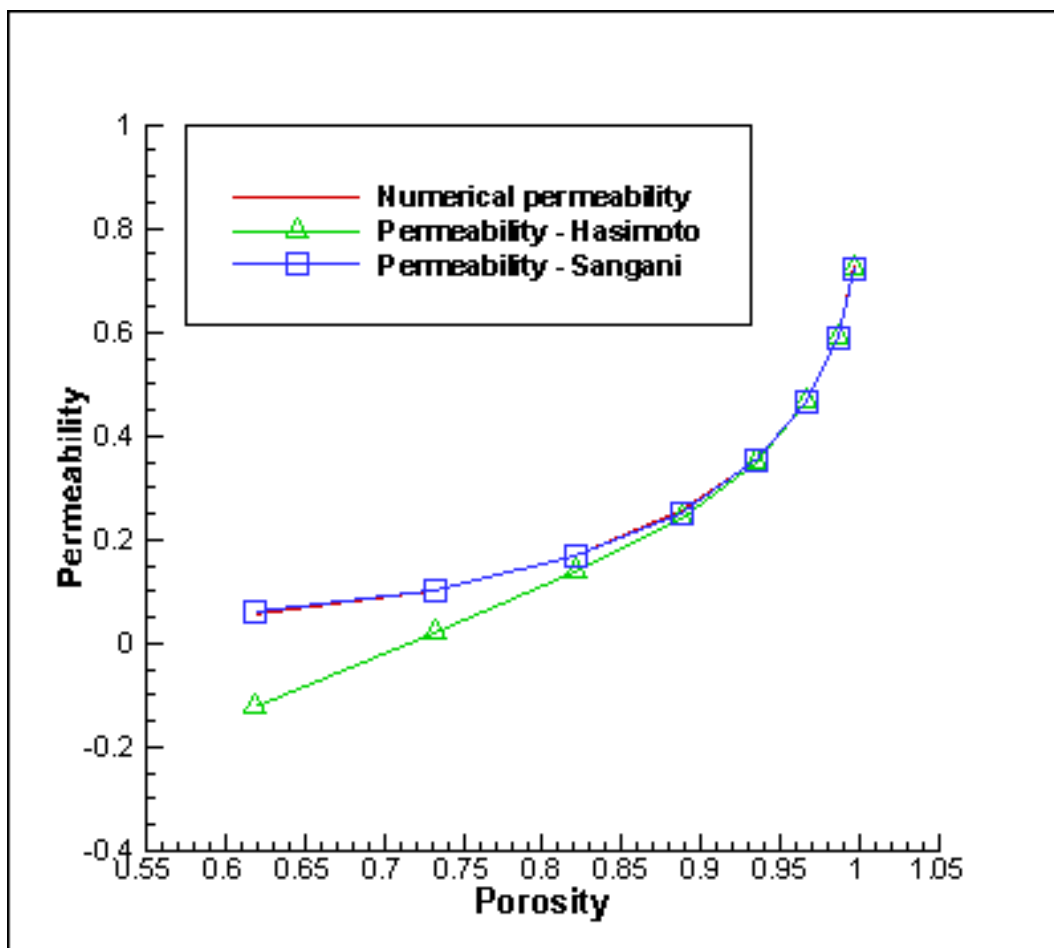
Сығылмау жағдайына байланысты (3.16) теңдеу келесі түрде жазылады:

$$\rho \frac{\nabla \cdot \vec{u}^*}{\Delta t} = \Delta p$$

7-кесте-кеуектіліктің әртүрлі мәндерінде бірдей, мезгіл-мезгіл орналастырылған шарлардан тұратын кеуекті ортаның өткізгіштігінің сандық және теориялық мәндерін салыстыру.

Кеуектілік	Өткізгіштіктің сандық мәні $\left(\frac{K}{D^2} \right)$ - $Re = 0$	Теориялық бағалау-Hasimoto[14]	Теориялық бағалау-Sangani[Ошибка! Источник ссылки не найден.]
------------	---	--------------------------------	---

0.9958	0.726507	0.720437	0.720439
0.9859	0.588303	0.588239	0.588284
0.9665	0.466785	0.464311	0.464738
0.9346	0.354147	0.349459	0.351880
0.8869	0.254166	0.241978	0.251733
0.8204	0.168394	0.136264	0.167080
0.7319	0.101175	0.021121	0.101855
0.6183	0.053298	-0.122238	0.058887



7 – сурет. Өткізгіштік мәндері

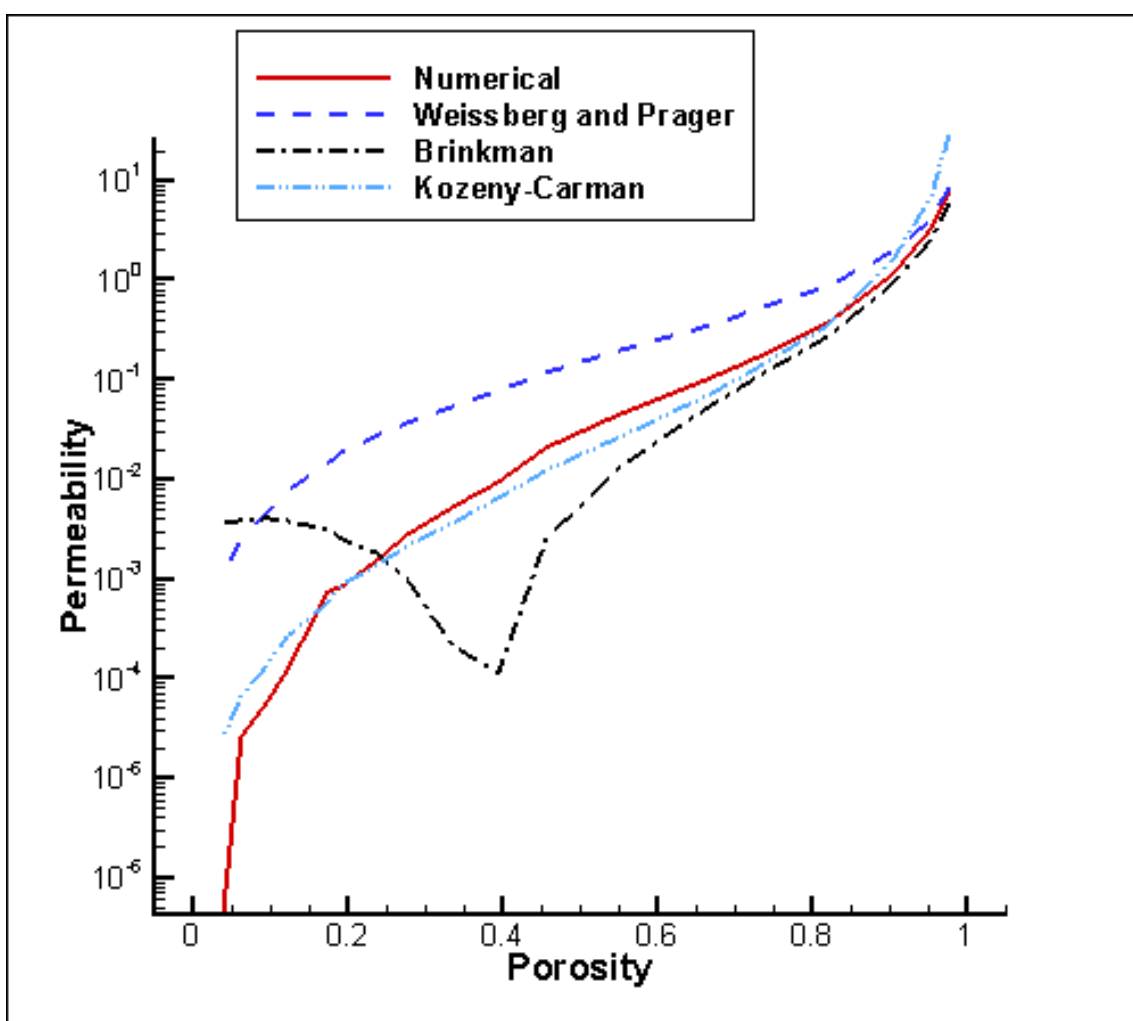
2.5 Кездейсоқ орналастырылған, өзара қиылысатын, бірдей шарлардан тұратын ортаның өткізгіштігінің теориялық және сандық мәнін салыстыру

11-кесте-кеуектіліктің әртүрлі мәндерінде бірдей, өзара қиылысатын шарлардан тұратын кеуекті ортаның өткізгіштігінің теориялық бағаларымен сандық мәнді салыстыру

Шарлардың саны	Кеуектілік	Өткізгіштіктің сандық мәні	Weissberg and Prager [Ошибка! Источник ссылки не найден.]	Brinkman [Ошибка! Источник ссылки не найден.]	Kozeny - Carman [4]
1	2	3	4	5	6
25	0.975632	7.37865	8.47257	5.94096	27.61630

50	0.952271	3.23440	4.12935	2.46946	6.72980
100	0.903008	1.14377	1.96175	0.92065	1.59858
200	0.819668	0.36960	0.88552	0.28096	0.36079
1	2	3	4	5	6
300	0.738228	0.17957	0.53296	0.11821	0.14476
400	0.669209	0.10816	0.36086	0.05575	0.07351
600	0.553261	0.04650	0.19607	0.01330	0.02662
800	0.455788	0.02073	0.11985	0.00251	0.01220
1000	0.395280	0.00931	0.07814	0.00011	0.00636
1200	0.336667	0.00534	0.05307	0.00021	0.00360
1400	0.277087	0.00279	0.03708	0.00099	0.00215
1600	0.234409	0.00149	0.02644	0.00183	0.00134
1800	0.191348	0.00084	0.01915	0.00255	0.00086
2000	0.173294	0.00073	0.01405	0.00310	0.00057

2400	0.120393	0.00011	0.00777	0.00374	0.00026
2800	0.093721	0.00005	0.00442	0.00396	0.00012
3200	0.062315	0.00002	0.00257	0.00393	0.00006
3800	0.038867	0.000000423	0.00117	0.00369	0.00002



8 – сурет. Өткізгіштік мәндері

3 Кеукті ортадағы екі фазалы сұйықтықтың ағымы

Бұл бөлімде кеукті ортадағы екі фазалы сұйықтықтың ағымы, яғни интерфейс бетімен бөлінген екі араласпайтын сұйықтықтың ағымы зерттеледі. Алайда, осы бөлімде қарастырылған теңдеулерді екіден көп араласпайтын компоненттері бар сұйықтық ағымы үшін де қолдануға болады.

Кеукті ортаға екінші сұйықтықты айдау арқылы бір сұйықтықты ығыстыру мәселесін зерттеген кезде, біріншісімен араласпайтын сұйықтық, тері тесігі масштабында екі араласпайтын сұйықтықтың бөліну шекарасының әрекетін ескеру қажет. Сондай-ақ, екі сұйықтықтың тұтқырлығын, яғни олардың айырмашылығын ескеру қажет, ал қоспаларда екі араласпайтын сұйықтықтың интерфейсінде пайда болатын беттік керілу Күшін ескеру қажет. Осылайша, айдалатын сұйықтық ығыстырылған сұйықтықтың ығысу сипатына әсер етеді.

Өздеріңіз білетіндей, екі араласпайтын сұйықтықтың ағымына арналған Дарси Заңы келесідей жазылады:

$$u_i = \frac{Kk_{r,i}}{\mu_i} \nabla p_i$$

еңбектерінде салыстырмалы фазалық өткізгіштік-бұл кеукті ортаның кеук кеңістігінде орналасқан араласпайтын сұйықтықтардың көлемдік лобтарының (немесе сұйықтықтардың қанықтылығы деп те аталады) функциясы екендігі көрсетілген. Кеукті ортадағы екі фазалы сұйықтықтың ағуына арналған Дарси Заңының тұжырымын жұмыста табуға болады. Жұмыста салыстырмалы фазалық өткізгіштіктің сулануға, яғни сұйықтықтардың қасиеті мен қатты беттің сұйықтыққа әсеріне байланысты екендігі эксперименттік жолмен дәлелденді. Ылғалдылық негізінен бөлімнің беті мен қатты бет арасында пайда болған бұрышпен анықталады.

Кеукті ортадағы екі фазалы сұйықтықтың ағымын зерттеу үшін бұл жұмыста тұтқыр, сығылмайтын, екі фазалы сұйықтыққа арналған Навье-Стокс теңдеулеріне негізделген математикалық модель қарастырылады. Содан кейін ылғалдылықтың екі фазалы сұйықтық ағымының сипатына әсерін зерттеу үшін жазық каналдағы екі фазалы сұйықтықтың ағымы қарастырылады. Бөлімнің соңында бірдей, кездейсоқ орналастырылған, өзара қиылысатын шарлардан тұратын кеукті ортадағы екі фазалы сұйықтықтың ағымы зерттеледі (2 бөлім). Мұндай кеукті ортаның өткізгіштігі 3-бөлімде есептелді.

3.1 Кеукті ортадағы екі фазалы сұйықтық ағымының математикалық моделі

Тұтқыр, сығылмайтын, екі фазалы сұйықтыққа арналған Навье-Стокс теңдеуі қарастырылады:

$$\frac{\partial \rho \vec{u}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u} \vec{u}) = -\nabla p + \nabla \cdot (2\mu E)$$

$$E = \frac{1}{2}(\nabla \vec{u} + \nabla \vec{u}^T)$$

$$\nabla \cdot \vec{u} = 0$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u}) = 0$$

$$\rho = F\rho_1 + (1-F)\rho_2$$

$$\mu = F\mu_1 + (1-F)\mu_2$$

Осылайша, параметр келесі мәндерді қабылдайды:

$$F(x, y, z) = \begin{cases} 1, & \text{если жидкость 1 находится в т. } (x, y, z) \\ 0, & \text{иначе} \end{cases}$$

Егер (4.6) теңдеуді (4.5) алмастырсақ, онда екі араласпайтын сұйықтықтың интерфейсінің қозғалысын сипаттайтын келесі теңдеуді аламыз:

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla F = 0$$

Екі араласпайтын сұйықтықтың интерфейсінің орналасуы мен формасын дәл анықтау үшін бұл жұмыста сұйықтық көлемінің әдісі қолданылды [54, 76]. Фазалық бөлімнің бетіне келесі шекаралық шарттар қойылды:

$$[\vec{u}]_S = 0$$

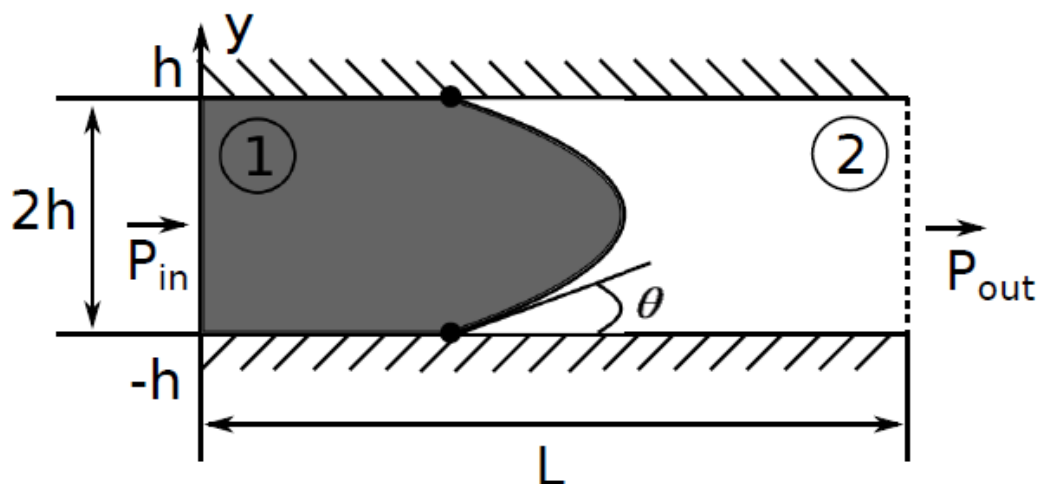
$$-\left[-p + 2\mu \vec{n} \cdot E \cdot \vec{n}\right]_S = \sigma k$$

$$k = -\nabla \cdot \vec{n}$$

$$-\left[2\mu \dot{t} \cdot E \cdot \vec{n}\right]_S = \dot{t} \cdot \nabla_S \sigma$$

3.2 Жазық каналдағы екі фазалы сұйықтықтың ағынын сандық зерттеу

Жазық арнадағы Екі фазалы сұйықтықтың ағымы каналдың ұштарындағы қысымның төмендеуіне байланысты қарастырылады.



9 – сурет. Жазық каналдағы 2 фазалы сұйықтықтың ағыны

Бұл міндет үшін келесі шекаралық шарттар қолданылды:

1) арнакіреберісіндегішекаралықшарттар:

$$\frac{\partial u_{in}}{\partial x} = 0$$

$$v_{in} = 0$$

$$p_{in} = 1$$

2) Каналдың шеттерінде :

$$u_w = \lambda \frac{\partial u}{\partial n}$$

$$v_w = 0$$

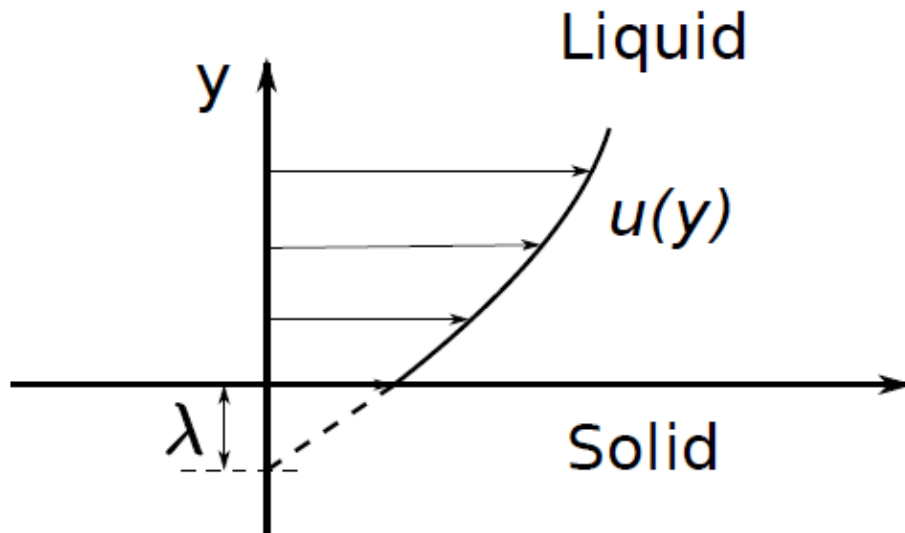
$$\frac{\partial p_w}{\partial y} = 0$$

3) Граничное условие на выходе канала:

$$\frac{\partial u_{out}}{\partial x} = 0$$

$$v_{out} = 0$$

$$p_{out} = 0$$



10 – сурет. Сұйықтықтың қатты бетке сырғуының шекаралық жағдайы

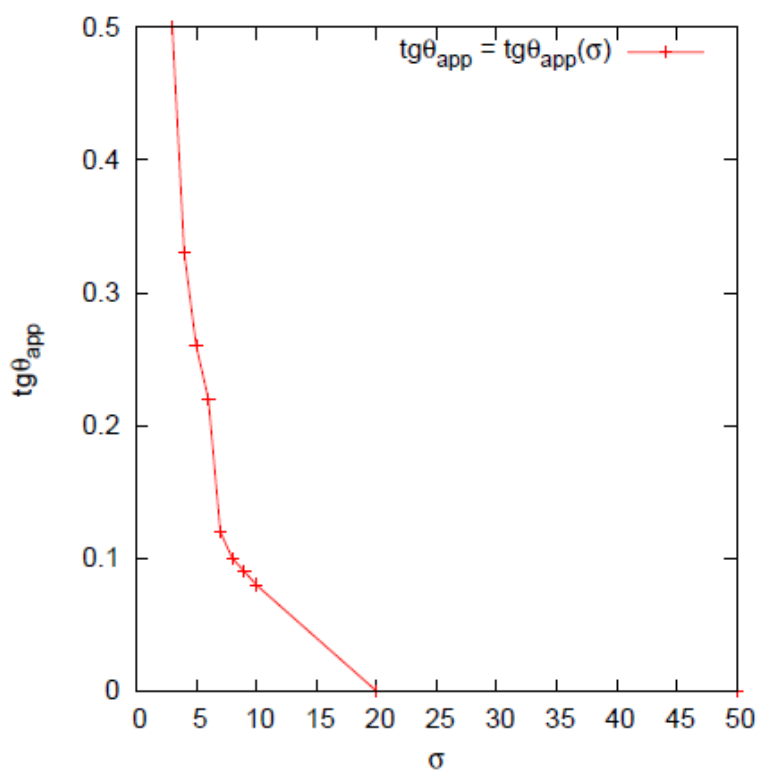
Осылайша, саусақтың пайда болуы анықталған жағдай беттік керілу коэффициентіне байланысты.



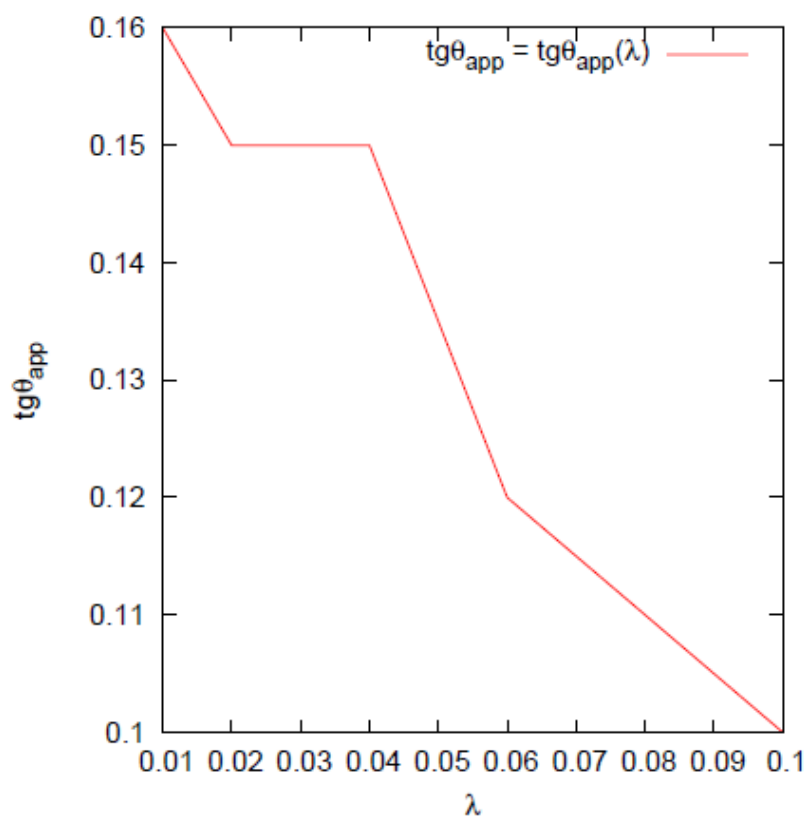
11 – сурет. Фазалар бетінде саусақ тәрізді пайда болу.



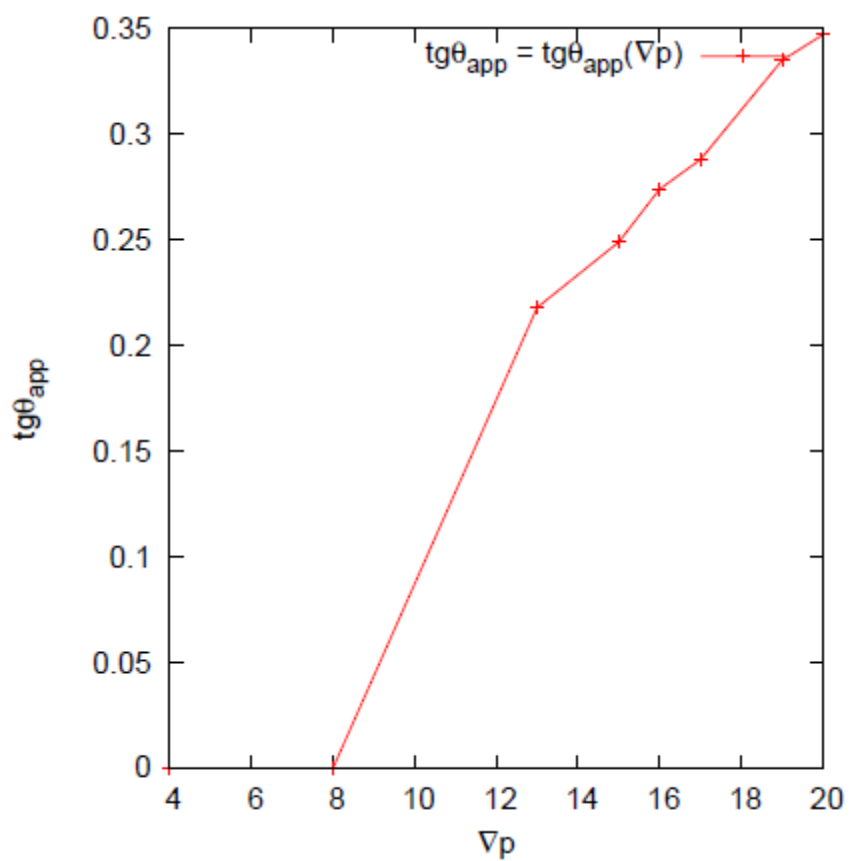
12 – сурет. Фазалық бөлімнің тұрақты беті



13 – сурет. Беттік керілу коэффициентінің әртүрлі мәндеріндегі байланыс бұрышының өзгеруі



14 – сурет. Сырғу қалыңдығының әртүрлі мәндеріндегі байланыс бұрышының өзгеруі



15 – сурет. Қысым градиентінің әртүрлі мәндеріндегі байланыс бұрышының өзгеруі

ҚОРЫТЫНДЫ

Бұл жұмыста кеуекті ортаның кеуек кеңістігіндегі бір және екі фазалы сұйықтықтың ағымы зерттелген. Жұмыста кеуекті ортадағы бір фазалы сұйықтықтың ағымы Дарсидің сызықтық Заңына бағынатындығы теориялық тұрғыдан дәлелденді, яғни сүзу жылдамдығы кеуекті орта біртекті, изотропты болған кезде қысымның айырмашылығына тура пропорционал және мұндай ортадағы ток Стокс теңдеуіне бағынғанда, яғни ток Рейнольдстың аз санында жүреді және Навье-Стокс теңдеуіндегі конвективті мүшелерді елемеуге болады.

Макроскопиялық параметрлерді есептеудің екі әдісі бар: бірінші әдіс модельді жеңілдетуге және теориялық бағалауды табуға негізделген, екінші әдіс кеуекті ортадағы кеуек кеңістігінің күрделі геометриясын ескере отырып, кеуекті ортадағы сұйықтық ағынын сандық модельдеуге негізделген. Бірінші әдіспен кеуекті ортаның қатты фазасы мезгіл-мезгіл немесе кездейсоқ орналастырылған цилиндрлер немесе шарлар түрінде болады. Кеуекті ортаның осындай геометриялық сипаттамасымен макроскопиялық параметрлердің теориялық бағаларын және олардың арасындағы байланысты алуға болады.

Осы модельдердің бірінде кеуекті ортаның қатты фазасы мезгіл-мезгіл орналастырылған цилиндрлер түрінде болады. Мұндай кеуекті ортаны талшықты кеуекті орта деп те атайды. Талшықты кеуекті орта өнеркәсіпте және инженерлік құрылымдарда кеңінен қолданылады, мысалы, жылу алмастырғыштар, сүзгілер, катализаторлар және т.б. талшықты кеуекті ортаның өткізгіштік коэффициентін бағалаудың алғашқы нәтижелері эксперименттік жұмыста және теориялық жұмыстарда. Талшықты кеуекті ортаның цилиндрлерінің осьтері бойындағы токтар темекі сүзгілері арқылы, өсімдіктердің сабақтарында және жылу алмасу резервуарларындағы құбырлардың айналасында идеализацияланған токтар болып табылады. Цилиндрлердің осьтеріне перпендикуляр ағымды зерттеу нәтижелерін суды немесе газдарды тазартуға арналған сүзгілерді жасау кезінде қолдануға болады. Бұл жүйелердің өткізгіштігін есептеудің эксперименттік жұмыстарына толық шолуды әдебиеттерден табуға болады. Кейінірек бір-біріне параллель орналасқан цилиндрлер үшін талшықты кеуекті ортаның өткізгіштігінің аналитикалық және сандық мәні алынды. Бұл шешім кеуектіліктің өте кіші және үлкен мәндеріне ғана дәл келеді.

Дипломдық жұмыс барысында алынған негізгі ғылыми нәтижелер::

- бірлік көлем аймағы үшін бірдей радиустағы шарлардан тұратын кеуекті ортаның бұл параметрлері () кездейсоқ осы көлемде орналастырылған, әр түрлі тәсілдермен, шарлардың саны тең немесе одан да көп болған кезде аздап өзгеретіні анықталды .

- бұл шарлардың саны тең немесе үлкен болған кезде осы параметрлердің сандық мәндері теориялық мәндерден ерекшелене бастайды.

- алынған өткізгіштіктің сандық мәндері кеуектілік пен нақты беттің параметрлерінің көпшілігінің Козен-қалтаны теориялық бағалауға жақсы

сәйкес келетіні анықталды, тек кеуектілік бірлікке жақын болған кезде немесе нөлге жақын болған кезде.

- кеуектілік мәндерінде өткізгіштік нөлге тең болатындығы анықталды және кеуектіліктің бұл мәні теориялық бағалауларға сәйкес келеді.

-фазалық бөлімнің беті мен қатты бет арасында пайда болған байланыс бұрышы сырғанау жағдайына аздап тәуелді екендігі анықталды, бірақ екі фазалы сұйықтықтың физика-химиялық қасиеттері өзгерген кезде, сондай-ақ микро каналдағы сұйықтық ағымының гидродинамикалық параметрлері өзгерген кезде айтарлықтай өзгереді (мысалы, қысымның төмендеуі).

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

- 1 Михайлов Н.Н., Моторова К.А., Сечина Л.С. Смачиваемость нефтегазовых пластовых систем – РГУ Нефти и Газа им. И.М. Губкина, 2019 г. – 361 с.
- 2 Fricke M., Bothe D. Boundary conditions for dynamic wetting – A mathematical analysis // The European Physical Journal. – 2020. – Vol. 229. – P. 1849 – 1865.
- 3 Bear J. Dynamics of fluids in porous media - New York: Elsevier, 1972. - 757 p.
- 4 Scheidegger A.E. The Physics of Flow Through Porous Media - Toronto: University of Toronto Press, 1974. - 361 p.
- 5 Roth K. Soil Physics. Lecture Notes - Heidelberg: Institute of Environmental physics, University of Heidelberg, 2007. - 300 p.
- 6 Van Doormaal M. A. and Pharoah J. G. Determination of permeability in fibrous porous media using the lattice Boltzmann method with application to PEM fuel cells // International Journal for Numerical Methods in Fluids. - 2009. - Vol. 59, Issue 1. - P. 75 - 89.
- 7 Clauge D.S., Philips R.J. A numerical calculation of the hydraulic permeability of three-dimensional disordered fibrous media // Phys. Fluids. - 1997. – Vol. 9, Issue 6. - P. 1562 - 1572.
- 8 Tomadakis M.M., Robertson T. Viscous permeability of random fiber structures: comparison of electrical and diffusion estimates with experimental and analytical results // J. Compos. Materials. - 2005. – Vol. 39, Issue 1. - P. 163 - 188.
- 9 Gostick J.T., Fowler M.W., Pritzker M.D., Ioannidis M.A., Behra L.M. In-plane and through-plane gas permeability of carbon fiber electrode backing layers // J. Power Sources. - 2006. – Vol. 162, Issue 1 - P. 228 - 238.
- 10 Feser J.P., Prasad A.K., Advani S.G. Experimental characterization of in-plane permeability of gas diffusion layers // J. Power Sources. - 2006. – Vol. 162. – P. 1226 – 1231.
- 11 Kaviani M. Principles of Heat Transfer in Porous Media - New York: Springer-Verlag, 1992. - P. 709.
- 12 Sullivan R.R. Specific surface measurements on compact bundles of parallel fibers // J. Appl. Phys. - 1942. - Vol. 13. - P. 725–730.
- 13 Kuwabara S. The forces experienced by randomly distributed parallel circular cylinders or spheres in a viscous flow at small Reynolds numbers // J. Phys. Soc. Jpn. - 1959. - Vol. 14. - P. 527–532.
- 14 Hasimoto H. On the periodic fundamental solutions of the Stokes equations and their application to viscous flow past a cubic array of spheres // J. Fluid Mech. - 1959. - Vol. 5, № 2. - P. 317 - 328.
- 15 Happel J. Viscous flow relative to arrays of cylinders // AIChE. - 1959. - Vol. 5, № 2. - P. 174 - 177.
- 16 Astroem B., Pipes R., Advani S. On flow through aligned fiber beds and its application to composite processing // J. Compos. Mater. - 1992. - Vol. 26. - P. 1351–1373.

17 Jackson G.W., James D.F. The permeability of fibrous porous media // Can. J. Chem. Eng. - 1986. - Vol. 64. - P. 364–374.

18 Sangani A.S., Acrivos A. Slow flow past periodic arrays of cylinders with application to heat transfer // Int. J. Multiphase Flow. - 1982. - Vol. 8, № 3. - P. 193 - 206.

