



МАТЕМАТИКАЛЫҚ ЖӘНЕ КОМПЬЮТЕРЛІК МОДЕЛЬДЕУ  
МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ  
MATHEMATICAL AND COMPUTER MODELING

DOI 10.51885/1561-4212\_2023\_4\_11  
MFTAA 81.93.29

Н.С. Айтбек<sup>1</sup>, Р.У. Мукашева<sup>2</sup>, Ж.Т. Рахметуллина<sup>3</sup>, Р.О. Мухамедова<sup>4</sup>

Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен қ., Қазақстан

<sup>1</sup>E-mail: Nurzat.syrymuly@gmail.com

<sup>2</sup>E-mail: mukashevaru@mail.ru\*

<sup>3</sup>E-mail: rahmetullina@mail.ru

<sup>4</sup>E-mail: rmukhamedova@mail.ru

### ВВЭР-1000 ЯДРОЛЫҚ РЕАКТОРЫНДАҒЫ ЖЫЛУФИЗИКАЛЫҚ ПРОЦЕСТЕРДІ КОМПЬЮТЕРЛІК МОДЕЛЬДЕУ

### КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ЯДЕРНОМ РЕАКТОРЕ ВВЭР-1000

### COMPUTER SIMULATION OF THERMOPHYSICAL PROCESSES IN THE VVER-1000 NUCLEAR REACTOR

**Аңдатпа.** Атом энергетикасында су-сулы реакторларын басым пайдалану олардың артықшылықтарымен байланысты. Су тежегіш және салқындатқыш ретінде өте қолайлы, ықшам, жоғары қуат және қарапайым реактор дизайнын қамтамасыз етеді. Су-сулы реакторлары реактивтіліктің теріс температуралық коэффициентіне байланысты жоғары тұрақтылық пен өзін-өзі реттеуге ие. Олардың белсенділігі қысқа өмір сүретін нуклидтерге байланысты, бұл биологиялық қорғаныс пен жабдыққа қол жеткізуді жеңілдетеді. Су жылуды тиімді түрде кетіреді. Дегенмен, кемшіліктері де бар: нейтрондардың судың жоғары сіңуі, судың біркелкі таралуын талап ету, коррозиялық белсенділік, қымбат тазарту жүйесі және температураны шектеу. Орнату қуатын арттыру белсенді аймақтағы жылу шығаруды теңестіру арқылы мүмкін болады. Бұл дәл термогидравликалық есептеуді қажет етеді.

Зерттеу нәтижесінде ВВЭР-1000 реакторының жылу генерациялау агрегатындағы жылу берудің теориялық жылу гидравликалық есебі жылу генерациялау агрегатындағы жылу шығарудың орташа өлшенген және максималды мәндері үшін алынды. Жылу беру қондырғысында орташа жүктеме кезінде энергияны бөлу үшін жылу беруді компьютерлік модельдеу жүргізілді. Алынған нәтижелер салыстырылды және талданды. Есептеу нәтижесінде ВВЭР-1000 жылу бөлгіш жинағының корпусындағы жылу тасымалдағыштың, отынның және реактордың жылу бөлгіш элементінің таралу кестесі мен температура өрісі алынды.

**Түйін сөздер:** Су-сулы энергетикалық реакторы (ВВЭР); жылу бөлетін жиынтық; бөлгіш элемент; салқындатқыш.

**Аннотация.** Приоритетное использование водо-водных реакторов в атомной энергетике обусловлено их преимуществами. Вода идеально подходит в качестве замедлителя и хладагента, обеспечивая компактность, высокую мощность и простую конструкцию реакторов. Водо-водные реакторы обладают высоким сопротивлением и саморегуляцией благодаря отрицательному температурному коэффициенту реакционной способности. Их активность обусловлена короткоживущими нуклидами, что облегчает биологическую защиту и доступ к оборудованию. Вода эффективно отводит тепло. Однако, существуют и недостатки: высокое поглощение нейтронов водой, требование равномерного распределения воды, коррозионная активность, дорогостоящая система очистки и ограничение температуры. Увеличение

единичной мощности возможно за счет выравнивания тепловыделения в активной зоне. Для этого необходим точный теплогидравлический расчет.

В результате исследования получен теоретический теплогидравлический расчет теплообмена в тепловыделяющем наборе реактора ВВЭР-1000 для средневзвешенных и максимальных значений тепловыделения в тепловыделяющем наборе. Также было проведено компьютерное моделирование теплообмена для распределения умеренно нагруженной энергии в тепловыделяющем наборе. Проведено сравнение полученных результатов и их анализ. В результате расчета получен график распределения и температурное поле тепловыделяющего элемента теплоносителя, топлива и реактора в оболочке тепловыделяющего комплекта ВВЭР-1000.

**Ключевые слова:** Водо-водный энергетический реактор (ВВЭР); тепловыделяющий комплект; разделительный элемент; теплоноситель.

**Abstract.** The priority use of water-water reactors in the nuclear power industry is due to their advantages. Water is ideally suited as a moderator and refrigerant, providing compactness, high power and simple reactor design. Water-water reactors have high resistance and self-regulation due to the negative temperature coefficient of reactivity. Their activity is caused by short-lived nuclides, which facilitates biological protection and access to equipment. Water effectively removes heat. However, there are also disadvantages: high neutron absorption by water, the requirement of uniform distribution of water, corrosion activity, expensive cleaning system and temperature limitation. An increase in unit power is possible due to the equalization of heat generation in the core. This requires an accurate thermohydraulic calculation.

As a result of the study, a theoretical thermohydraulic calculation of heat transfer in the heat-generating set of the VVER-1000 reactor was obtained for the weighted average and maximum values of heat release in the heat-generating set. Computer simulation of heat transfer was also carried out for the distribution of moderately loaded energy in the heat-generating set. The results obtained were compared and analyzed. As a result of the calculation, the distribution graph and temperature field of the heat-releasing element of the coolant, fuel and reactor in the shell of the VVER-1000 heat-releasing kit were obtained.

**Keywords:** Water-water power reactor (VVER); fuel release kit; separation element; coolant.

*Кіріспе.* Атом энергетикасында су-сулы реакторларын басым пайдалану бірқатар себептермен түсіндіріледі. Олар, ең алдымен, су-сулы ядролық реакторлар үшін модератор және салқындатқыш ретінде ең қолайлы материал болып табылатындығымен ерекшеленеді. Су-сулы реакторларының қасиеттері жақсы зерттелгендегі ұзақ уақыт бойы технологияның әртүрлі салаларында қолдануға үлкен мүмкіндіктер берді. Судың ең жоғары баяулау қабілеті және су-сулы реакторлары белсенді аймақтың көлем бірлігінен салыстырмалы түрде жоғары энергия бөлінуі бар болғандықтан қандай көлем бірлігі қарастырылса да, үлкен қуат алуға себепкер болады. Құрылымының салыстырмалы түрде қарапайымдылығы суды бір уақытта модератор және жылутасымалдағыш ретінде пайдалану су-сулы реакторларды құруға мүмкіндік береді.

Су-сулы реакторлары реактивтіліктің теріс температуралық коэффициентінің арқасында жоғары қарсылыққа және өзін-өзі реттеуге ие. Судың белсенділігі қысқа өмір сүретін нуклидтерге байланысты, бұл биологиялық қорғауды және бірінші тізбектің жабдықтарына қол жетімділікті біршама жеңілдетеді. Судың көрсетілген артықшылықтарына қарамастан, оны ядролық реакторларда пайдалану бірқатар қиындықтарды тудырады.

Судың салыстырмалы түрде жоғары сіңуі белсенді аймақтағы нейтрондық тепендікке теріс әсер етеді және тек байытылған уранды пайдалануды анықтайды, бұл су-сулы реакторларында салыстырмалы түрде нейтрондардың төмен көбею коэффициентіне әкеледі. Судағы нейтрондардың қатты баяулауы босатылған энергияның үлкен жергілікті біркелкі емес таралуына әкелуі мүмкін. Сондықтан, су-сулы реакторын жобалау кезінде белсенді аймақта судың біркелкі таралуын қамтамасыз ету қажет.

Құрылымдық материалдары бар судың салыстырмалы түрде жоғары коррозиялық белсенділігі арнайы және қымбат су тазарту жүйесін қажет етеді, бұл пайдалану шығындарына айтарлықтай әсер етеді. Қолайлы температураны алу үшін жоғары қысым

кажет. Температуралық деңгейдің шектелуіне байланысты су-сулы реакторлары бар қондырғылар үшін қаныққан бу циклі тән. Су салқындатқышты пайдалану кезіндегі нақты жылу ағыны сыни жылу жүктемелерімен шектеледі.

Бірлік қуатын ұлғайту белсенді аймақта жылу шығаруды теңестіру арқылы мүмкін болады. Ол үшін дәл жылу-гидравликалық есептеу қажет.

Осылайша, бұл жұмыстың мақсаты құрылымды физикалық негіздеуден және қойылған талаптарды қанағаттандыратын физикалық параметрлердің жиынтығын анықтаудан тұратын ВВЭР-1000 реакторының белсенді аймағының элементтерін жылу-гидравликалық есептеуді орындау болып табылады.

Осы мақсатқа жету үшін келесі міндеттер шешілді:

- Mathcad бағдарламалық кодын пайдалана отырып, ВВЭР-1000 реакторының белсенді аймағының конструкциялық элементтерінің параметрлерін бағалауды орындау;
- GAMBIT бағдарламасында ВВЭР-1000 реакторының жылу бөлетін жиынтық (ЖБЖ) сегментінің үш өлшемді есептік моделін әзірлеу;
- ЖБЖ-да энергия бөлуді бөлу үшін пайдаланушы функцияларын құру;
- ВВЭР-1000 реакторының ЖБЖ жылу күйінің ANSYS FLUENT бағдарламалық жасақтамасын қолдана отырып, тұрақты қуат деңгейінде ЖБЖ мен су арасындағы жылу алмасудың тұрақты режимінде есептеу;
- алынған нәтижелерге талдау жүргізу.

Зерттеу объектісі – су жылу тасымалдағышы бар ВВЭР-1000 реакторының белсенді аймағы болып табылады.

Жұмыстың практикалық маңыздылығы жылу - физикалық процестерді модельдеу арқылы жасалған есептеу моделін оқу немесе зерттеу мақсатында қолдану мүмкіндігі болып табылады.

*Әдеби шолу.* [1] мақалада 7-і электр жылытқыштары, 19 өзекті жылу бөлетін элементтердің имитаторлары арасында ВВЭР-1000 ядролық реакторының жылу құрастыру моделіндегі жылу алмасуды сандық есептеу нәтижелері келтірілген. Қалыпты су салқындатқышының ағыны есептеу гидродинамикасы және Star-CCM+бағдарламасы арқылы модельденеді. Мақалада РФ-Фэй негізгі айналым сорғысындағы физикалық эксперименттердің жылу беру коэффициентімен салыстыру арқылы дәлдікпен тексерілген математикалық модель ұсынылған. [2] мақалада авторлар жылу шығаратын құрылымдардың (ТВС) тербелістерін болжау үшін ВВЭР-1200 реакторының өзегіндегі жылу тасымалдағыш қысымының табиғи жиілігінің өзгеруін картаға түсірді және үш өлшемді CFD моделі арқылы жылу тасымалдағыштың орташа температурасы мен қысымын анықтады. Сондай-ақ, ТВС-2М тербелістерінің күшеюі салқындатқыштың қысымы мен температурасының белгілі бір мәндерінде жүзеге асырылады, олар реакторды іске қосудың әртүрлі кезеңдерінде күшейтілуі мүмкін.

[3] мақалада жаңа элементтері бар TVs-2M жылу бөлетін қондырғының орналасуының толық масштабты діріл сынақтары отын дірілінің жоғарылауына әкелмейтіні көрсетілген. Сондай-ақ, жылу тасымалдағыш ағынындағы ТВС-квадраттың жылу бөлетін түйінінің діріліне зерттеулер жүргізілді, ТВС-квадраттың тербелісі негізгі циркуляциялық сорғының жұмысына және Твел интервалдарының меншікті жиіліктеріне байланысты детерминирленген жиіліктермен қоздырылатыны анықталды. [4] мақалада сумен салқындатылған ядролық реакторлардың жұмыс режимдерін математикалық модельдеудің сенімділігінің өзекті мәселелері қарастырылады. Су-сулы энергетикалық реакторлары реакторларының қауіпсіздігін есептеу үшін бағдарламалық кешендерді талдауға баса назар аударылады. Қазіргі заманғы жылу гидравликалық кодтарды қолдана отырып, реакторлардың белсенді аймақтарындағы қауіпсіздіктің жылу-физикалық параметрлерін

анықтау әдістемесі қарастырылған. Тәжірибе нәтижелерін өзек жиынтықтарындағы жылу-гидравликалық сипаттамалары бойынша есептелген деректермен салыстыру жүргізілді. Өзек коллекторларындағы жылу дағдарысының шарттары талданады және сумен салқындатылған реакторлардың қауіпсіздік параметрлерін неғұрлым сенімді анықтау үшін жылу гидравликалық кодтарын жетілдіру жолдары талқыланады.

[5] мақалада су-сулы реакторларының жылу бөлетін элементтеріндегі (отынындағы) динамикалық жылу- физикалық процестерді талдауға арналған математикалық модель ұсынылған. Модель материалдың жылу-физикалық қасиеттерінің отын мен қабықтағы температура мен фазалық ауысуларға тәуелділігін ескереді. Эксперименттер жүргізілді, сандық алгоритм мен бағдарлама жасалды, екі фазалы аймақ құру үшін отын мен қабықтың балқуын қоса алғанда, әртүрлі режимдердегі отынның әрекеті туралы сандық мәліметтер алынды. [6] мақалада субканал кодтарында қолданылатын ядроның жылу шығару элементтеріндегі термомеханикалық процестерді талдауға арналған модельдер сипатталған. Әзірленген модельдер қалыпты жұмыс режимдері мен төтенше жағдайларды қоса алғанда, бірнеше отын элементтері бар отындық жинақтар – құрылымдардағы термофизикалық және термомеханикалық процестерді имитациялайтын бағдарламалық жүйелерге біріктіруге арналған.

[7] мақалада нанобөлшектер мен судың біртекті қоспасын реактордың салқындатқышы ретінде пайдаланудың жылу гидравликалық әсері зерттелген. Зерттеуде CFD коды жылу бөлетін жинақтың салқындату арнасын модельдеу және су/ $Al_2O_3$  нано сұйықтығы үшін жылу беру коэффициентін, қысымның төмендеуін және температура айырмашылығын есептеу үшін қолданылады. Нәтижелер нанобөлшектер мен су үшін жеке фазаларды қарастыратын екі фазалы модель бөлу торларын есепке алу және ағындағы бөлшектердің турбуленттілігі мен қозғалысын күшейту арқылы шынайы нәтиже беретінін көрсетеді. [8] мақалада сақиналы отынның ішкі және сыртқы салқындатуы бар әдеттегі ВВЭР-1000 реакторында салқындатқыш ретінде нано сұйықтығы жылу гидравликалық талдау ұсынылған. Зерттеу жұмысы сақиналы түйреуіш конфигурациясы бар жылу бөлетін жинаққа бағытталған және көлемі бойынша әртүрлі пайыздық су мен  $Al_2O_3$  бөлшектерінен тұратын нано сұйықтықты қарастырумен ерекшеленеді. Жанармай өзегі CFD кодын қолдану арқылы модельденеді және есептеу нәтижелері оларды алдыңғы зерттеулермен және аналитикалық тәсілдермен салыстыру арқылы тексеріледі. [9] мақалада MCU (Монте-Карло әмбебап) дәл нейтронды-физикалық кодын және Athlet жылу гидравликалық кодын ең жақсы бағалауды (жылу гидравликалық ағып кетулер мен өтпелі процестерді талдау) пайдалана отырып алынған ВВЭР-1000 реакторының жылу бөлетін жинағын жылу гидравликалық және нейтрондық кезең-кезеңмен модельдеу нәтижелері келтірілген. Көптеген объектілерден, геометриялық аймақтардан және материалдардан тұратын күрделі модельдер үшін арнайы кодтарды қолданып, бағдарламаларға өзгерістер енгізбестен бұрын бағдарламалар арасында деректердің үлкен көлемін беруді және оларды тиісті өңдеуді көздеу тұжырымдалған.

*Материалдар және зерттеу әдістері:* ВВЭР-1000 реакторының жылу бөлетін жинағы (19 өзекті жылу бөлетін элементтердің имитаторларынан тұрады, олардың 7-уі электр жылытқыш элементтері); реактордың белсенді аймағындағы су салқындатқышы; ВВЭР-1000 реакторының жылу бөлетін жинағындағы жылу алмасуды жылу гидравликалық есептеу әдістері; жиынтықтағы жылу шығарудың орташа өлшенген мәндерін және максималды мәндерін есептеу әдістері; жиынтықта орташа жүктелген энергияны бөлу кезінде реактордағы жылу алмасуды компьютерлік модельдеу; нәтижелерін талдау. Бұл материалдар мен зерттеу әдістері ВВЭР-1000 жылу бөлгіш жиынтығының жылу гидравликалық

сипаттамаларын талдау үшін, ондағы температура жағдайларын бағалау үшін қолданылды [10]- [11].

*GAMBIT бағдарламалық кодын қолдана отырып, геометриялық модель құру.* ВВЭР-1000 ядролық реакторындағы жылу-физикалық процестерін компьютерлік модельдеу процесін қарастыру.

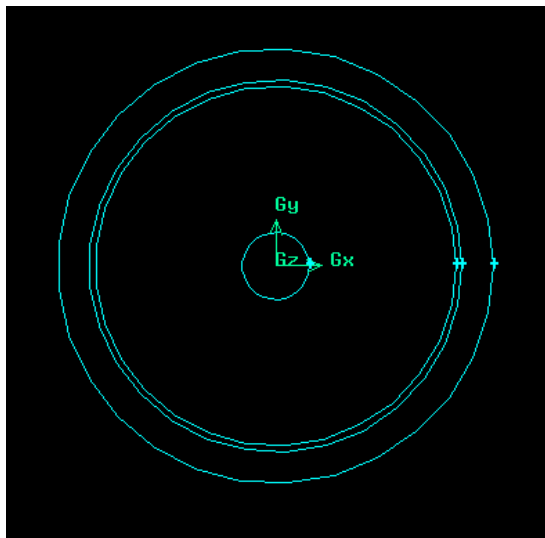
Жылу бөлетін жинақтар (ЖБЖ) – көптеген реакторлардың белсенді аймағына тиеуге арналған жбэлдердің пакеті (шоғыры). Ядролық отын арналарына жеке жүктелген бүйірлік тамырлар және бүйірлік төменгі рефлекторлардан пайда болған белсенді аймақтың барлық көлемін толтыратын шарлы желілер олардың ерекшеліктері болып табылады. Жылу бөлетін элементтердің (ЖБЭЛ) түріне байланысты ЖБЖ белсенді аймақтағы тірек конструкцияларына (корпустық реактор) немесе отын арналарына (арналық реактор) орнатылады [12]. ЖБЖ функцияларының сипаттамасы - жбэлдерді бекіту және дистанциялау, белсенді аймақта ағынды ұйымдастыру (ағынның талап етілетін бағытын, оның шамасын және таралуын қамтамасыз ету), ядролық отынмен көліктік-технологиялық операцияларды жеңілдету.

ВВЭР-1000 реакторының техникалық сипаттамалары 1-кестеде келтірілген.

**1-кесте.** ЖБЭЛ параметрлері

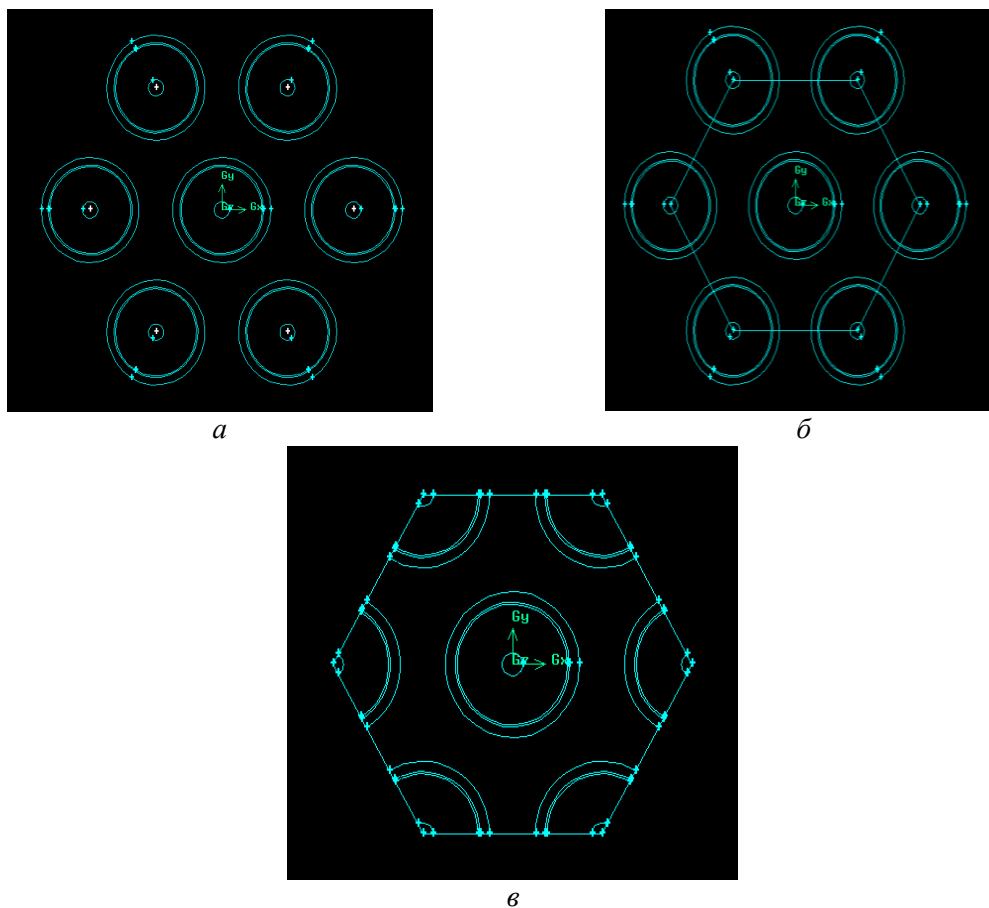
Параметрлер	Мәні
Отын	UO2
Отын таблеткасының сыртқы диаметрі, мм	7,5
Отын таблеткасының ішкі диаметрі (бөлу аймағы), мм	1,4
Отын бағанының биіктігі, мм	3500
Қабық материалы	08X18H10T
Қабықтың сыртқы диаметрі, мм	9,1
Қабықтың ішкі диаметрі, мм	7,7

Жылу гидравликалық есептеуді жүргізу үшін 1-суретте көрсетілгендей сақиналардың көмегімен уран таблеткасының моделін құру қажет.



**1-сурет.** 2D-де бір уран таблеткасының моделі

ВВЭР-1000 реакторында ЖБЭЛ дер үшбұрышты торда орналасқан, өйткені, орталықта бір толыққанды ЖБЭЛ модельденеді, оның айналасында 2-суретте көрсетілгендей, бірінші ЖБЭЛ-ге ұқсас алты ЖБЭЛ сызылады (2, а-сурет), орталық ЖБЭЛ-дің айналасында жылу тасымалдағыштың қуысын жасау үшін алты шеткі ЖБЭЛ-дердің орталықтарын алтыбұрышқа (2, б-сурет) қосылады және шеткі ЖБЭЛ-дердің сыртқы беттері алынады (2, в-сурет).



2-сурет. Орталық жбэлдің айналасында салқындатқыш қуысты құру

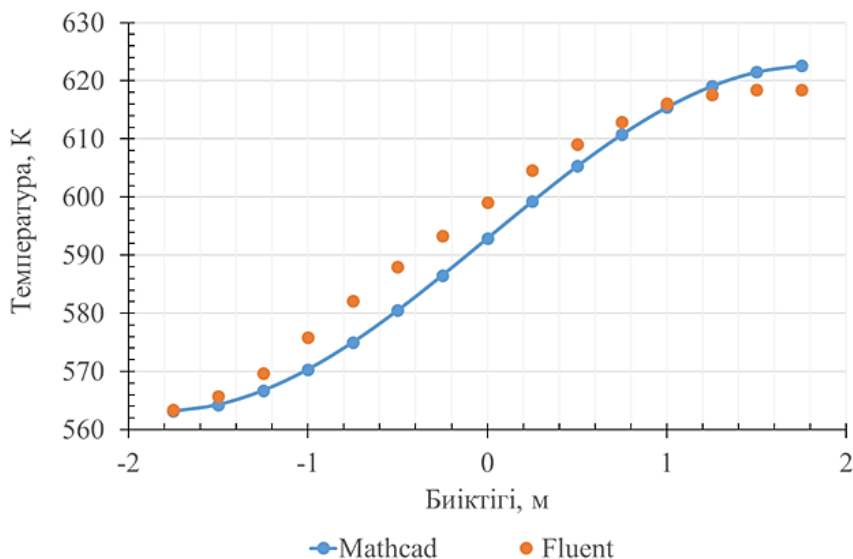
*Компьютерлік модельдеу объектісінің сипаттамасы.* ВВЭР-1000 реактордың жылу алмасуын модельдеу үшін белгілі геометриялық мәліметтер негізінде жеті ЖБЭЛ-ден тұратын үш өлшемді есептеу аймағы таңдалды. Зерттелетін ЖБЭЛ моделі отын ядросында орталық тесік пен отын және ЖБЭЛ қабығы арасындағы газ саңылауының болуын ескере отырып, жасалды. Таңдалған жылу шығаратын құрастыру аймағының моделін әзірлеу ANSYS FLUENT бағдарламалық кешенінің құрамына кіретін Gambit бағдарламасының көмегімен жүзеге асырылды [13].

Жылу-гидравликалық есептеу үшін материалдардың жылуфизикалық сипаттамаларының температураға тәуелділігінің тұрақсыздығын ескеру қажет болды. Модельдеудің жаңа мүмкіндіктерін қосу қажеттілігі туындады. Fluent-те бұл мүмкіндік пайдаланушы деп аталатын функциялардың көмегімен жүзеге асырылады (User – Defined Functions-UDFs). ВВЭР-1000 реакторының белсенді аймағының биіктігі бойынша энергия бөлуді «бөлу» пайдаланушы функциясының (User-Defined Functions – UDFs) көмегімен берілді [14].

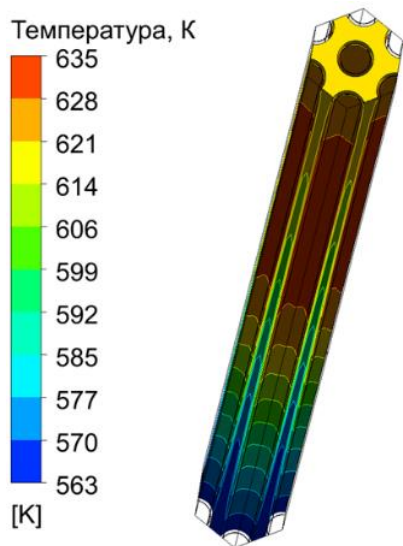
Есептеу нәтижелері және оларды талдау. Жылу гидравликалық есептеуді жүргізу үшін ANSYS FLUENT бағдарламалық кешені пайдаланылды, ол конвекцияның, сәулеленудің әртүрлі түрлерін қоса алғанда, жылу беруді модельдеу мәселелерін шешу үшін, сондай-ақ, жылу гидравликалық әртүрлі параметрлерді анықтау үшін қолданылады [15].

Есептеулер салқындатқыштың  $k-\epsilon$  қозғалысының турбулентті моделін қолдана отырып, жүргізілді. Есептеу нәтижесінде жылутасымалдағыштың, қабықтың, отынның температурасының таралуы, сондай-ақ, жылутасымалдағыштың жылдамдығын белсенді аймақтың биіктігі бойынша бөлу алынды.

3-суретте жылутасымалдағыштың температурасын белсенді аймақтың биіктігі бойынша бөлу көрсетілген. Мәндердің салыстырмалы ауытқуы 0,04-1,27 % аралығында болады.

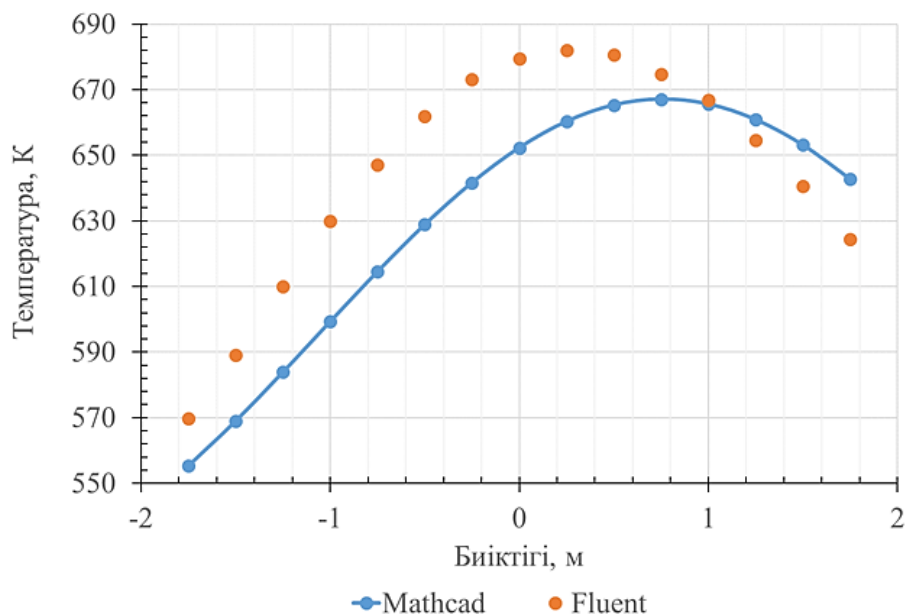


3-сурет. Жылу тасымалдауыштағы температураны белсенді аймақтың биіктігі бойынша бөлу

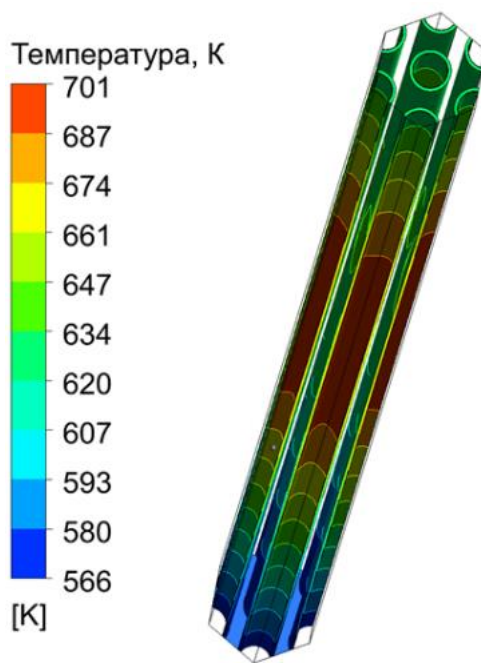


4-сурет. ВВЭР-1000 реакторының жылу тасымалдағышындағы температура өрісі

5-суретте белсенді аймақтың биіктігі бойынша қатты қабықтың ішкі бөлігінің температурасының таралуы көрсетілген. Mathcad бағдарламасы мен компьютерлік есептеу мәндерінің салыстырмалы ауытқулары 0,9-5 % құрайды. Мәндердің ауытқуы есептелген тордың құрылысына байланысты, өйткені, жылу алмасу процестерін егжей-тегжейлі сипаттау және алынған нәтижелердің дәлдігін арттыру үшін кішірек торды пайдалану қажет.



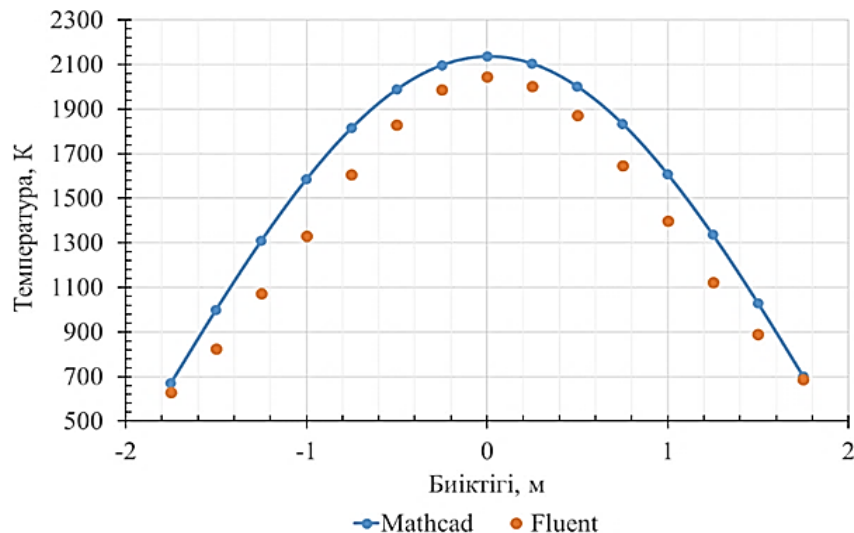
5-сурет. ЖБЭЛ қабығының ішкі бөлігінің температурасының таралуы



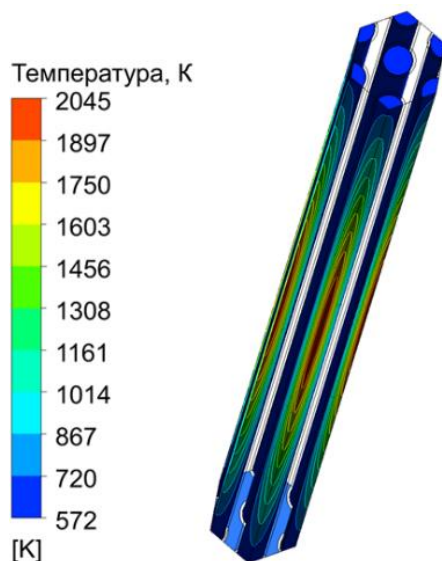
6-сурет. ВВЭР-1000 реакторының қабығындағы температура өрісі



7-суретте ядролық отын орталығының, отын температурасының реактордың активті аймағының биіктігі бойынша бөлінуі көрсетілген. Отындағы максималды температура мәндерінің салыстырмалы ауытқуы 4,2 % құрайды. Алынған нәтижелердің дәлдігіне есептелген тордың өлшемімен қатар алынған нәтижелердің дәлдігіне әсер ететін қолданылатын математикалық модельдер де әсер етеді.



7-сурет. Отын орталығындағы температураның таралуы



8-сурет. 30. ВВЭР-1000 реакторының отынындағы температура өрісі

4, 6, 8-суреттерде ВВЭР-1000 реакторының отынында, ЖБЖ қабығында және жылу тасығышында температура өрісі көрсетілген. 8-суреттен ядролық отын температурасы максималды жылу шығаратын жинақтың ортасында жететінін көруге болады. ВВЭР-1000 реакторының ЖБЖ-да энергия бөлінуінің біркелкі бөлінбеуі жбэлдер температурасының біркелкі бөлінбеуіне әкелді, бұл жбэлдерге жылу жүктемесінің ұлғаюына әкеледі.

*Нәтижелер мен қорытындылар.* ВВЭР-1000 реакторының ЖБЖ-да жылу алмасудың теориялық жылу гидравликалық есебі жбэлдегі энергия шығарудың орташа жүктелген және максималды жүктелген мәндері үшін жүргізілді. Сондай-ақ, жбэлде орташа жүктелген энергия бөлу үшін жылу алмасуды компьютерлік модельдеу жүргізілді. Алынған нәтижелерді салыстыру және оларды талдау жүргізілді.

Есептеу нәтижесінде ВВЭР-1000 реакторының жылу тасымалдауыштағы, отындағы және ЖБЭЛ ЖБЖ қабығындағы таралу графигі мен температура өрісі алынды.

Алынған нәтижелерді талдау мынаны көрсетті:

1) ЖБЖ-тен шығатын жылутасымалдағыштың температурасы Mathcad бағдарламасын есептеу кезінде 623 К және жбэлде энергияның орташа жүктелу мәні үшін компьютерлік модельдеу кезінде 619 К құрайды. Алдын ала есептеу мәндерінің және компьютерлік модельдеу нәтижесінің салыстырмалы ауытқуы 0,64 % құрайды. Шығудағы температураға отын мен ЖБЭЛ қабығындағы рұқсат етілген температурадан аспай қол жеткізіледі.

2) ЖБЭЛ қабығында алынған максималды температура сәйкесінше 638 К және 624 К құрайды, салыстырмалы ауытқулар 2,19 % құрайды. Қабықтың температурасы цирконий қорытпасы үшін рұқсат етілген температурадан аспайды, ол  $t \approx 2130$  К құрайды.

3) Отын өзегінің максималды температурасы сәйкесінше 2136 К және 2045 К құрайды. Салыстырмалы ауытқулар 4,2 % құрайды. Бұл температура ЖБЭЛ ортасында байқалады және рұқсат етілген температурадан аспайды, ол 3073 К құрайды.

Алынған нәтижелерді салыстыру нәтижесінде алынған нәтижелердің дәлдігін арттыру үшін кішкене торды пайдалану керек, зерттелетін құбылысты егжей-тегжейлі сипаттайтын математикалық модельдерді қолдану керек екенін көрсетті. Бұл әрекеттер нәтижелердің дәлдігін жақсартады, бірақ көп уақыт пен есептеу ресурстарын қажет етеді.

Жылу гидравликалық белсенді аймақты есептеу күрделі математикалық процесс болып табылады. Дәл нәтиже алу үшін жылу алмасудың нақты процесінде болатын барлық процестерді ескеру қажет.

#### Әдебиеттер тізімі

1. Марков П.В. К вопросу о численном расчете теплоотдачи от стержневых тепловыделяющих элементов ядерных реакторов ВВЭР // Машиностроение и компьютерные технологии. 2014. № 11.
2. Проскуряков К.Н., Анисеев А.В., Афшар И., Писарева Д.А. Использование Cfd модели реактора ВВЭР-1200 для прогнозирования вибраций ТВС // Глобальная ядерная безопасность. 2019. № 4 (33).
3. Егоров Ю. В. Экспериментальные исследования вибрации ТВЭЛов ТВС-2М и ТВС-КВАДРАТ в потоке теплоносителя в обоснование вибрационной прочности // Научно-техническая конференция молодых специалистов, ФГУП ОКБ «Гидропресс. – 2016.
4. Шараевский Г.И. Проблемы расчетного определения кризиса теплоотдачи в тепловыделяющих сборках водоохлаждаемых реакторов / Г.И. Шараевский, Н.М. Фиалко, Л.Б. Зимин, И.Г. Шараевский // Ядерная физика та энергетика. – 2018. – Т. 19. – № 2. – С. 111-120. [http://nbuv.gov.ua/UJRN/yadf\\_2018\\_19\\_2\\_5](http://nbuv.gov.ua/UJRN/yadf_2018_19_2_5).
5. А.Н. Черепанов, А.С. Басин, Л.Ф. Мещерякова, Б.Г. Покусаев, «Компьютерное моделирование нестационарных теплофизических процессов в тепловыделяющем элементе при набросе нагрузки», ТВТ, 34:1 (1996), 57-62; High Temperature, 34:1 (1996), 53-58.
6. Семенович О. В. моделирование термомеханических процессов в стержневых ТВЭЛх // Ядерные технологии: от исследований к внедрению-2021. – 2021. – С. 75-77.
7. Hadad, K., Rahimian, A., & Nematollahi, M. R. (2013). Numerical study of single and two-phase models of water/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanofluid turbulent forced convection flow in VVER-1000 nuclear reactor. *Annals of Nuclear Energy*, 60, 287-294. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2013.05.017>
8. Ghazanfari, V., Talebi, M., Khorsandi, J., & Abdolahi, R. (2016). Thermal–hydraulic modeling of water/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanofluid as the coolant in annular fuels for a typical VVER-1000 core. *Progress in Nuclear Energy*, 87, 67-73. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2015.11.008>

9. Romanenko, V., Bachdanovich, R., Bogdanova, E., Nikonov, S., & Tikhomirov, G. (2017, October). Complex modeling of VVER-1000 fuel assembly using codes MCU/ATHLET. In 27th Symposium of AER on VVER Reactor Physics and Reactor Safety, Munich, Germany Oct.
10. <http://www.atominfo.ru/newsz04/a0504.htm>
11. Коротких А.Г., Шаманин И.В. Теплогидравлические процессы в ядерном реакторе и расчет их основных параметров. Учебное пособие. – Томск: Издательство ТПУ, 2008. – 108 с.
12. Дементьев Б.А. Ядерные энергетические реакторы: Учебник для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 352 с.
13. Gambit, V. 2.2. 30 and 2.3. 16, Fluent Inc., 2005 and 2006.
14. ANSYS Fluent Tutorial Guide, 2021. [https://doku.pub/documents/ansysfluenttutorialguide\\_2021r1-408gnkdj2vqx](https://doku.pub/documents/ansysfluenttutorialguide_2021r1-408gnkdj2vqx)
15. О.В. Батурин, Н.В. Батурин, В.Н. Матвеев Расчет течений жидкостей и газов с помощью универсального программного комплекса FLUENT: Электронное учебное пособие. Самара, 2010.

#### References

1. Markov P.V. K voprosu o chislenom raschete teplootdachi ot sterzhnevyyh teplovydelyayushih elementov yadernyyh reaktorov VVER // Mashinostroenie i kompyuternye tehnologii. 2014. № 11.
  2. Proskuryakov K.N., Anikeev A.V., Afshar I., Pisareva D.A. Ispolzovanie Cfd modeli reaktora VVER-1200 dlya prognozirovaniya vibracij TVS // Globalnaya yadernaya bezopasnost. 2019. № 4 (33).
  3. Egorov Yu. V. Eksperimentalnye issledovaniya vibracii TVELov TVS-2M i TVS-KVADRAT v potoke teplonositelya v obosnovanie vibracionnoj prochnosti // Nauchno-tehnicheskaya konferenciya molodykh specialistov, FGUP OKB «Gidropress. – 2016.
  4. Sharaevskij G.I. Problemy raschetnogo opredeleniya krizisa teplootdachi v teplovydelyayushih sborkah vodoohlazhdaemykh reaktorov / G.I. Sharaevskij, N.M. Fialko, L.B. Zimin, I.G. Sharaevskij // Yaderna fizika ta energetika. – 2018. – T. 19. – № 2. – S. 111-120. [http://nbuv.gov.ua/UJRN/yadf\\_2018\\_19\\_2\\_5](http://nbuv.gov.ua/UJRN/yadf_2018_19_2_5).
  5. A.N. Cherepanov, A.S. Basin, L.F. Mesheryakova, B.G. Pokusaev, «Kompyuternoe modelirovanie nestacionarnyyh teplofizicheskikh processov v teplovydelyayushem elemente pri nabrose nagruzki», TVT, 34:1 (1996), 57-62; High Temperature, 34:1 (1996), 53-58.
  6. Semenovich O. V. modelirovanie termomehanicheskikh processov v sterzhnevyyh TVELah // Yadernye tehnologii: ot issledovaniy k vnedreniyu-2021. – 2021. – S. 75-77.
  7. Hadad, K., Rahimian, A., & Nematollahi, M. R. (2013). Numerical study of single and two-phase models of water/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanofluid turbulent forced convection flow in VVER-1000 nuclear reactor. *Annals of Nuclear Energy*, 60, 287-294. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2013.05.017>
  8. Ghazanfari, V., Talebi, M., Khorsandi, J., & Abdolahi, R. (2016). Thermal-hydraulic modeling of water/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanofluid as the coolant in annular fuels for a typical VVER-1000 core. *Progress in Nuclear Energy*, 87, 67-73. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2015.11.008>
  9. Romanenko, V., Bachdanovich, R., Bogdanova, E., Nikonov, S., & Tikhomirov, G. (2017, October). Complex modeling of VVER-1000 fuel assembly using codes MCU/ATHLET. In 27th Symposium of AER on VVER Reactor Physics and Reactor Safety, Munich, Germany Oct.
  10. <http://www.atominfo.ru/newsz04/a0504.htm>
  11. Коротких А.Г., Шаманин И.В. Теплогидравлические процессы в ядерном реакторе и расчет их основных параметров. Учебное пособие. – Томск: Издательство ТПУ, 2008. – 108 с.
  12. Деметьев Б.А. Ядерные энергетические реакторы: Учебник для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 352 с.
  13. Gambit, V. 2.2. 30 and 2.3. 16, Fluent Inc., 2005 and 2006.
  14. ANSYS Fluent Tutorial Guide, 2021. [https://doku.pub/documents/ansysfluenttutorialguide\\_2021r1-408gnkdj2vqx](https://doku.pub/documents/ansysfluenttutorialguide_2021r1-408gnkdj2vqx)
  15. О.В. Батурин, Н.В. Батурин, В.Н. Матвеев Расчет течений жидкостей и газов с помощью универсального программного комплекса FLUENT: Электронное учебное пособие. Самара, 2010.
- 
-