



Многопрофильная инженерная олимпиада «Звезда» «Ядерная энергетика и технологии»

11 класс

Заключительный этап

2018-2019

Задания, ответы и критерии оценивания

1. (25 баллов) В природе существуют два изотопа урана – ^{235}U и ^{238}U (два вида атомов урана, отличающихся массой). В атомной энергетике используется топливо, в котором содержится значительно большее количество ^{235}U , чем в природной урановой руде. Поэтому природный уран необходимо обогащать по ^{235}U . Идея диффузионного обогащения урана заключается в том, что газообразное соединение – UF_6 (шестифтористый уран) – пропускают через трубку, стенки которой содержат микроскопические поры. Оказывается, что газ, прошедший через поры, содержит больше молекул с ^{235}U , чем исходный. Почему? Оцените, во сколько раз изменится отношение числа изотопов ^{235}U к числу изотопов ^{238}U в смеси после однократного прохождения через пористую стенку.

Решение:

Поры в мембране не обладают селективностью, а пропускают все молекулы, которые в них попали. В смеси молекул любых газов каждая компонента обладает одинаковой средней кинетической энергией (одинаковой температурой). Но поскольку масса молекул UF_6 , содержащих ^{235}U меньше, они в среднем имеют большие скорости, чем молекулы содержащие ^{238}U , причем в

$$\frac{v_5}{v_8} = \sqrt{\frac{m_8}{m_5}} = 1,0064 \text{ раза.}$$

где v_5 и v_8 – средние скорости молекул ^{235}U и ^{238}U соответственно. А поскольку число ударов ΔN молекул с площадкой ΔS за время Δt можно оценить как

$$\Delta N \approx nv\Delta t\Delta S$$

где v – средняя скорость молекул, n – концентрация, то количество пролетевших сквозь пору молекул, содержащих ^{235}U больше количества молекул, содержащих ^{238}U . Поэтому концентрации ^{235}U и ^{238}U урана после прохождения пор n'_5 и n'_8 будут относиться как

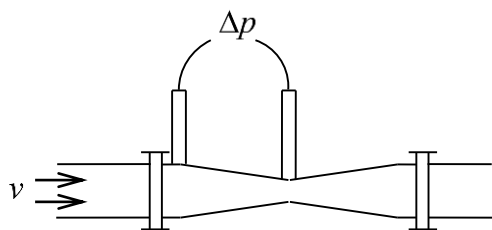
$$\frac{n'_5}{n'_8} = \frac{n_5 v_5}{n_8 v_8} = \frac{n_5}{n_8} \sqrt{\frac{m_8}{m_5}} = 1,0064 \frac{n_5}{n_8}$$

Следовательно, после однократного прохождения пористой перегородки отношение числа молекул шестифтористого урана, содержащих ^{235}U , к числу молекул, содержащих ^{238}U , увеличивается в 1,0064 раза.

Критерии оценки:

1. Если школьник правильно сформулировал идею и больше ничего не сделал – 25 % от полной оценки.
2. Если школьник понимает, что и как нужно делать (считать отношение числа ударов молекул, содержащих ^{235}U и ^{238}U), но допущены серьезные ошибки – 50 % от полной оценки.
3. Если в принципе все делается правильно, но есть недочеты – 75 % от полной оценки.
4. Если все верно – максимальная оценка.

2. (25 баллов) Для определения скорости теплоносителя (воды) в системе теплоотвода атомного реактора часто используется трубка переменного сечения (трубка Вентури; см. рисунок), в которой измеряется разность давлений воды в малом и большом сечении. В каком из сечений трубки – большом или малом – давление воды больше и почему? Найти скорость воды, если разность показаний манометров в большом и малом сечениях трубки равна Δp , а радиус большого сечения вдвое больше радиуса малого.



Трубка Вентури

Решение:

По закону Бернулли имеем для большого и малого сечений

$$p_1 + \frac{\rho v_1^2}{2} = p_2 + \frac{\rho v_2^2}{2} \quad (*)$$

где p_1 и p_2 - давления, v_1 и v_2 - скорости воды в большом и малом сечениях. Из условия несжимаемости воды (условие непрерывности потока) для рассматриваемых сечений получаем

$$v_1 S_1 = v_2 S_2 \quad (**)$$

где S_1 и S_2 - площади указанных сечений. Поскольку $S_1 > S_2$, из (**) следует, что $v_1 < v_2$, а из (*), что $p_1 < p_2$. Выражая из (**) скорость v_2 и подставляя в (*), получим

$$v_1 = \sqrt{\frac{2\Delta p S_2^2}{\rho(S_1^2 - S_2^2)}} \quad (***)$$

Для $S_1 = 2S_2$ получаем из (***)

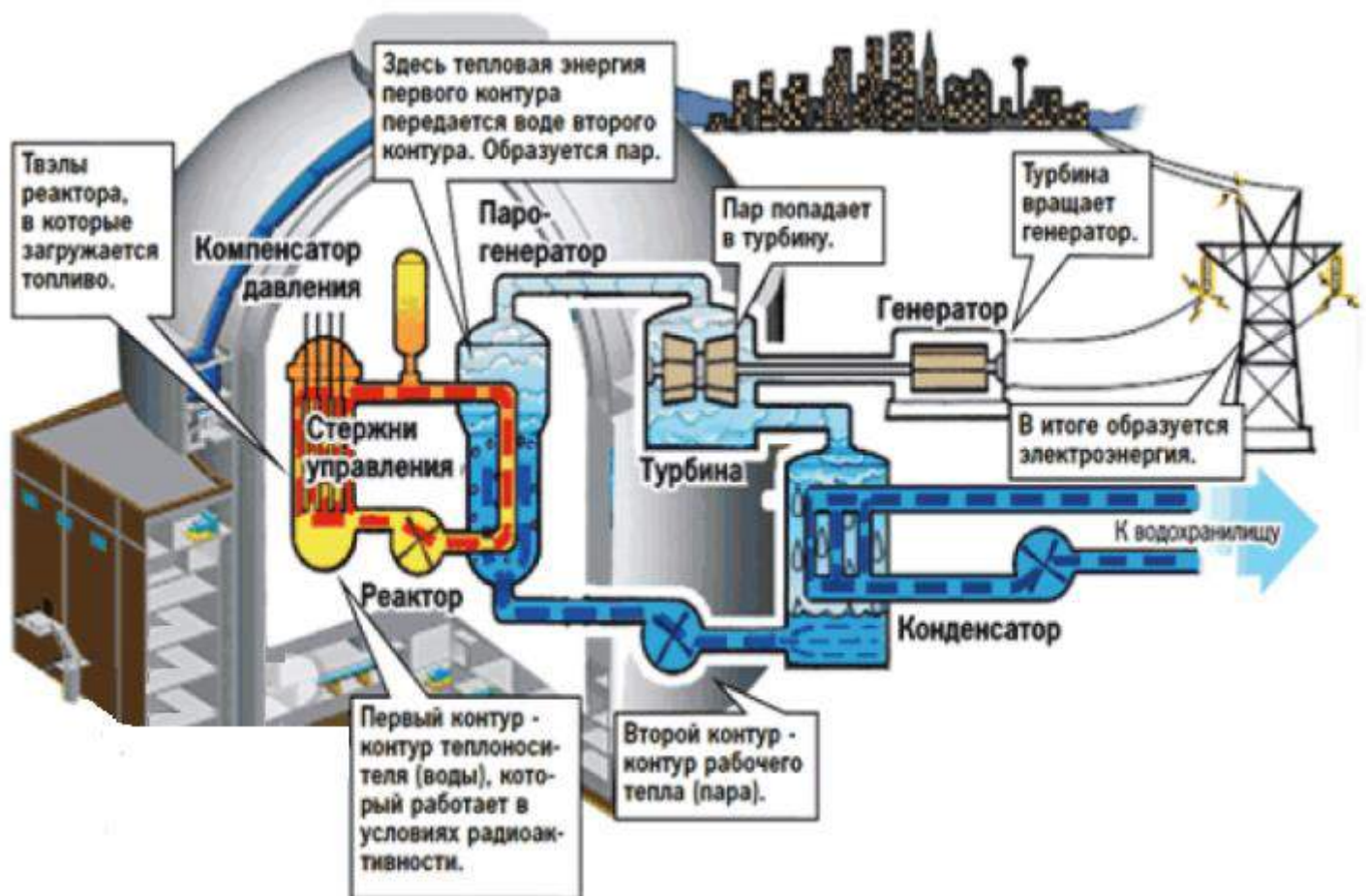
$$v_1 = \sqrt{\frac{2\Delta p}{3\rho}}$$

Критерии оценки:

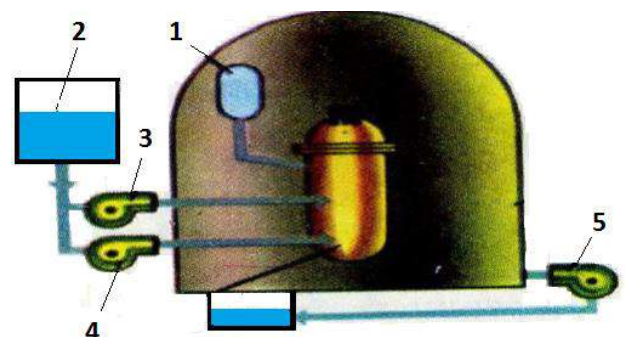
1. Если использована одна из следующих формул – закон Бернулли или условие непрерывности, но больше ничего не сделано - 25 % от полной оценки.
2. Если понимает, что и как нужно делать, но допущены серьезные ошибки - 50 % от полной оценки.
3. Если в принципе все делается правильно, но есть недочеты – 75 % от полной оценки.
4. Если все верно – максимальная оценка.

3. (50 баллов) Авария на АЭС «Три-Майл-Айленд» – крупнейшая авария в истории коммерческой атомной энергетики США, произошедшая 28 марта 1979 года на втором энергоблоке станции. Рассмотрите хронологию аварии, реакцию на нее персонала станции и укажите ошибки в их действиях, а также недостатки в конструкции реактора.

В рабочем режиме тепло, выделяющееся в топливных элементах реактора, нагревает поступающую в реактор под действием насосов воду первого контура охлаждения. Эта вода нагревает в парогенераторе воду второго контура охлаждения, превращая ее в пар. Пар вращает турбины генератора, который вырабатывает электроэнергию.



При аварии насосов первого и второго контуров охлаждения предусмотрена система аварийного охлаждения реактора, которая должна предотвратить его перегрев с расплавлением активной зоны реактора. Принципиальная схема системы аварийного охлаждения реактора содержит пассивную и активную части. Пассивная часть – аварийные емкости (2 на рисунке), вода из которых может подаваться в реактор под действием силы тяжести. Активная часть – система насосов высокого давления (3,4,5), работающих от резервных источников питания и подающих воду в реактор.



Хронология аварии и реакция на нее персонала АЭС была следующей.

1. Отказ насосов второго контура охлаждения. Вода второго контура перестала поступать в парогенератор. Автоматически включилась аварийная система подачи воды в парогенератор, но вода в парогенератор не поступала, поскольку задвижки насосов были закрыты после планового ремонта.

2. Стало расти давление воды в первом контуре, поскольку прекратился отток тепла от него. Автоматически сработала система компенсации давления, сбрасывающая пар из первого контура в специальную емкость (барботер). Автоматически сработала (через 9 секунд после исходного события) система аварийной остановки реактора.
3. Рост температуры прекратился, давление в первом контуре начало падать, но утечка (воды из первого контура) продолжилась, поскольку клапан системы компенсации давления не закрылся (неисправен). При этом индикаторы на пульте управления показывали, что клапан закрыт.
4. При падении давления в первом контуре ниже 12 МПа (при нормальном давлении 16 МПа) сработала активная система охлаждения активной зоны насосами высокого давления. Из трех имеющихся насосов операторы оставили работающим один, поскольку уровнемер в компенсаторе объема показывал, что вода поступает в реактор в большем, чем нужно количестве. В действительности продолжалась утечка воды из реактора (уровнемер неисправен).
5. Падение давления привело к вскипанию теплоносителя в активной зоне, образованию в верхней части активной зоны парового пузыря. Пузырь начал расти, создал давление и понизил уровень теплоносителя в активной зоне, оголив верхушки тепловыделяющих элементов.
6. Через 8 минут после начала аварии операторы обнаружили, что вода не поступает в парогенератор, задвижки аварийной системы насосов были открыты.
7. Через 14 минут после начала аварии пар из-за образования пара давление в компенсаторе давления превысило допустимый предел и пар начал поступать под гермооболочку реактора,
8. Через 38 минут после начала аварии обходчики доложили, что включились насосы откачивающие воду из-под гермооболочки реактора. Операторы отключили их.
9. Температура внутри гермооболочки стала расти. Стал расти также нейтронный поток в реакторе. Операторы приступили к экстренному вводу в реактор бора (поглотителя нейтронов), чтобы не допустить вывода реактора на рабочий режим.
10. Через 1 час 13 минут после начала аварии из-за большого количества пара в первом контуре стали вибрировать насосы первого контура. Операторы отключили 2 (из 4) главных насоса. Из-за наличия пара в реакторе прекратилась также естественная циркуляция теплоносителя.
11. Только через 2,5 часа после начала аварии операторы поняли причину – уход теплоносителя из первого контура из-за неисправности клапана системы сброса давления. Клапан был закрыт в первый контур стала поступать охлаждающая вода. За это время температура активной зоны реактора за счет остаточного тепловыделения достигла С, оболочки тепловыделяющих элементов (ТВЭЛов) были частично разрушены, с выделением большого количества водорода. Уровень радиоактивности в реакторе значительно вырос.
12. Только в этот момент операторы поняли масштаб аварии и попытались включить циркуляционные насосы для охлаждения реактора. Но в реакторе скопилось большое количество водорода, мешающего свободному протеканию теплоносителя. Насосы включить не удалось.
13. Было принято решение об увеличении давления в первом контуре и постепенном удалении водорода из реактора. Только через 15 часов после начала аварии удалось запустить один циркуляционный насос первого контура. А в состоянии «холодный останов» реактор был приведен только через месяц после аварии.
14. За время аварии ТВЭЛы частично расплавились, активная зона реактора была сильно повреждена, однако расплавленное топливо не прожгло корпус реактора, поэтому влияние аварии на окружающую территорию оказалось незначительным. Эвакуация населения не проводилась.

Нарушение работы каких узлов реактора оказало наиболее существенное влияние на развитие аварии? Какие из перечисленных действий операторов АЭС (по пунктам) были верными, а какие нет? Что нужно было изменить в действиях персонала? Конструкцию каких узлов реактора нужно доработать для устранения возможности подобных аварий?

Решение:

Причины аварии:

Ошибки эксплуатации:

Эксплуатация станции при закрытых клапанах автоматической подачи питательной воды

Отключение автоматической системы охлаждения автоматической защиты реактора

Напрасное отключение главных циркуляционных насосов (1-ый контур остался без циркуляции на протяжении 12 часов)

Отказ в работе оборудования:

Неправильные показания уровнемера

Отказ клапана компенсатора объема

Выход из строя одного из парогенераторов

Конструктивные недоработки:

Недостаточно надежная работа конденсаторно-питательного тракта АЭС

Нарушение теплоотвода в парогенераторе приводит к быстрому его осушению

КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ ПРОЕКТОВ ШКОЛЬНИКОВ

Задание включает две части: расчетную и проектную.

Общая максимальная сумма – 100 баллов.

1. Расчетная часть.

1.1. Расчетная часть включает состоит из двух задач.

1.2. Максимальная оценка расчетной задачи – 25 баллов.

1.3. Если задача полностью решена с получением правильных числовых ответов, то оценивается 25 баллами.

1.3. Если задача в основном решена, то есть: все основные расчетные зависимости, связанные с сутью задачи получены, но часть несущественных для данной задачи зависимостей не получена и правильного числового результата нет, то задача оценивается 20 баллами.

1.4. Если имеются расчетная схема, начальные (канонические) уравнения для решения задачи, но они не преобразованы для получения итоговых расчетных зависимостей и задача не имеет числового результата, то задача оценивается 10 баллами.

2. Проектная часть.

2.1. Проектная часть должна включать одно наилучшее конструкторско-технологическое предложение по решению поставленной задачи.

2.2 Максимальная оценка проектной части 50 баллов.

2.3. Оценивание проектной части строится на экспертной оценке члена жюри с учетом следующих положений.

2.3.1. Оценка проектной части производится по следующим пяти критериям:

– Полнота исследования проблемы: обзор и анализ ближайших прототипов. Максимальная оценка 10 баллов, т.е. максимум можно получить 10 баллов.

– Оригинальность идеи, положенной в основу предлагаемого решения. Максимум 20 баллов.

– Логика изложения: описание того, как получена идея; описание решений по ее воплощению; конструкторско-технологическая и, возможно, экономическая проработка. Максимум 20 баллов.

– Возможность практического осуществления предложенных решений. Максимум 10 баллов.

– Наличие, качество и достаточность схем и рисунков. Максимум 10 баллов.

Требования к оформлению проектов при решении задач олимпиады.

Решение оформляется в виде пояснительной записки на листах формата А4, в которой должны быть следующие обязательные элементы и разделы (выделено жирным шрифтом; если участник не может написать содержание раздела, то заголовок раздела нужно привести, но под заголовком указать: «Реализация раздела не представляется возможной»):

Титульный лист с идентификацией участника.

Решение расчетной задачи. Каждая задача должна начинаться с заголовка «Задача № ____».

Решение проектной задачи должно включать следующие разделы.

Введение (указывается область задачи, ее актуальность и общие схемы известных решений).

1. Анализ текущего состояния дел в области поставленной задачи. Должны быть перечислены наиболее близкие известные решения, дан перечень их достоинств и недостатков.
2. Цели и задачи исследования. На основе проведенного анализа уточняется: с какой целью проводится выполнение проекта; далее перечисляются частные задачи, которые необходимо решить для достижения указанной цели.
3. Поиск и формулирование идеи, которая будет положена в основу решения поставленной в условии задачи. Показать путь, который необходимо было пройти, чтобы прийти к оригинальной идее. Рекомендуется использовать методику ТРИЗ.
4. Развитие идеи в конкретных конструкторско-технологических решениях. Дать проработку воплощения идеи в конкретных устройствах или процессах, дать необходимые расчетные схемы, эскизы, другие иллюстрации с их названиями.
5. Технические, экономические, экологические расчеты. Привести необходимые расчетные схемы и расчеты показывающие работоспособность конструкции или ее частей, реализуемость процессов. По возможности, показать, почему предлагаемое решение окажется экономически выгодным, при необходимости, дать экологическую оценку решения. Допускается использование расчетов, аналогичных приведенным выше в расчетной части задания.

Выводы.

Дать общую оценку полученного решения, достижения поставленной цели, новизну, практическую полезность решения. Учащиеся должны оформить записку проекта черной авторучкой (ярко для возможности последующего сканирования). Почерк должен быть разборчивым или текст следует написать чертежным шрифтом. Нумерация страниц внизу посередине обязательна.