

[26/09/2023] «Жаркая ядерная батарейка» - мини-АЭС для жаркого климата, например, для пустыни Сахара в Африке.

Андрей Виноградов, к.т.н., гл. конструктор проектов.



До сих пор в мире даже не намечена стратегия развития атомного реакторостроения в 21-ом веке в условиях много полярного Мира и без доллара. Многие писатели - академики даже «закидывают атомную энергию камнями». Нет общепризнанной атомщиками России концепции технологии атомной мини-АЭС, которая не требует строительных работ, ремонта и обслуживания, не требует управленческого персонала на время срока эксплуатации, не требуют воды для охлаждения энергоблока, легко доставляется в любую точку планеты любым транспортом, и т.д. и т.п. А главное, что деньги от таких безопасных и дешёвых малогабаритных энергоблоков будут возвращаться продавцу без каких-либо кредитов сразу, поскольку разовые затраты на их сооружение в десятки раз меньше, чем мегапроекты АЭС с водо-водяными реакторами.

Тем не менее, сегодня все менеджеры и журналисты крутятся вокруг водо-водяного атомного реактора, разработки В.В. Стекольниковца из середины прошлого века. Дошло до того, что зарубежные академики пишут: - «Более того, инвестиции в атомную энергетику – это невозвратные затраты, которые затрудняют последующий переход на возобновляемые источники энергии» [1] - это полный бред. Я так предполагаю, что это провокация против России, которая единственная в мире до сих пор, хоть и мега-АЭС, но строит за свои деньги и кредиты, и обслуживает, и обеспечивает ядерным топливом.

Дешёвая и безопасная технология электрогенерации, например, возможна в виде «Ядерных батареек» [2], которые легко доставить в любую точку планеты, делает только первые шаги испытания и производства, до повсеместного её применения на Земле. Заявления Якопо Буонджорно профессора ядерной инженерии Массачусетского технологического института (MIT) США, Роберт Фрида, основателя компании GenH, и др.: - «Микрореакторы могут полностью изменить правила игры в атомной отрасли» [3] имеют фундаментальные основания для будущего поколения атомщиков. Тем не менее, уже сейчас можно рассмотреть в первом приближении варианты возможного применения «Ядерных батареек», и их изменённую конструкцию для электропитания районов планеты Земля с жарким климатом и отсутствием воды. Они подойдут и для северных районов планеты, например, для месторождений Якутии. А также для энергоснабжения инопланетных станций для землян и электрометаллургического производства там,

например, в Китайском проекте освоения Луны, или в Российском проекте «Луна 27» 2030 года, или при освоении неисчерпаемых месторождений государств Африки, курируемых ВЧК Евгением Пригожиным.

В дальнейшем рассуждении в данной статье нужны будут, в первую очередь, конструкторам-изобретателям новой ядерной техники и студентам старших курсов по атомной тематике для выполнения курсовых и дипломных проектов.

При разработке идеи мини-АЭС для жаркого климата применён постулат - «условия эксплуатации будущего энергоблока определяют конструкцию атомного реактора, а не наоборот», как сегодня, уже имеющийся опробованный старый проект АЭС с водо-водяным реактором, опираясь на постулат «референтности», приспособливают к новым условиям эксплуатации.

Исходя из моего постулата, определились следующие пункты концепции:

1. Температура окружающего воздуха 85 °С.
2. На месте размещения возможны пылевые (песочные) бури со скоростью ветра до 40 м/с (этот параметр влияет только на конструкцию и прочность вытяжной трубы, и может быть уточнен для конкретного места расположения энергоблока).
3. После монтажа запуск энергоблока производится только один раз без потребления внешнего электроснабжения.
4. Энергоблок должен охлаждаться самостоятельно без потребления электроэнергии.
5. Энергоблок не должен требовать воды во всех режимах работы, в том числе при аварийной остановке и расхолаживании ядерного топлива в специальных контейнерах - «гробиках».
6. Установка энергоблока на месте эксплуатации не должна требовать выполнения строительных работ.
7. Ресурс непрерывной работы в автоматическом режиме 25000 часов, без ремонта и обслуживания.
8. Электрическая мощность энергоблока должна быть не менее 5 МВт.
9. Для снижения массогабаритных характеристик энергоблока применить высокооборотистые турбокомпрессор и электрогенератор (на 400 Гц).
10. Передача электрической мощности от энергоблока к потребителю после выпрямления переменного тока с электрогенератора производится постоянным током по трех проводной схеме специальным кабелем за пределы охранной зоны энергоблока.

11. В случае короткого замыкания в нагрузке (скачкообразное уменьшение электрического сопротивления нагрузки) реактор должен автоматически быстро сбросить мощность и перейти в режим вентиляции активной зоны.
12. Потребитель электроэнергии не должен заботиться о персонале обслуживания и о замене отработавшего свой срок энергоблока.
13. Доставку и замену отработавшего свой срок штатно (или с аварией) производит самостоятельно завод-изготовитель в течении 3-х суток с момента оплаты.
14. Потребитель оплачивает сразу только установленную мощность, а также количество потреблённой электроэнергии, т.е. электроэнергия становится товаром, а не мегапроектом с неопределённым сроком окупаемости.
15. У потребителя электроэнергии не должно быть никаких хлопот с лицензионными бумагами, утилизацией энергоблока и отходов ядерного топлива, поскольку энергоблок является собственностью завода-изготовителя, и он решает все эти вопросы сам.
16. Нужно сделать атомную генерацию электроэнергии дешёвой, использующей дешёвый уран 238, которого в природе хватит не менее чем на 200 лет.
17. Применить принцип Energy Multiplier (EM²) для получения нового топлива, которое будет использоваться повторно на заводе-изготовителе, что снизит накопление отходов ядерного топлива в захоронениях.
18. Снизить тариф на электроэнергию, как минимум в 2 раза, по сравнению с водо-водяными реакторами мега-АЭС и плавучей АЭС.
19. Конструкция энергоблока должна быть простой и надёжной, которую легко можно довести до массового изготовления конвейерным способом на заводе-изготовителе.
20. Энергоблок должен имеет собственную охранную систему от террористического нападения, в том числе с воздуха.
21. Энергоблок должен выдерживать максимальную сейсмонагрузку.
22. На месте отработавшей свой срок мини-АЭС должна остаться только «зелёная лужайка».

В процессе разработки идеи мини-АЭС для жаркого климата будут, несомненно, возникать и другие пункты концепции, которые будут добавляться к указанным выше.

Исходя из пунктов концепции, получаем следующее логичное, как вариант, техническое решение энергоблока:

Атомный реактор должен быть на быстрых нейтронах со сверхкритическим циклом газового теплоносителя - углекислого газа CO₂, одноконтурный с большим к.п.д., чем у водо-водяной технологии. Только в быстром реакторе можно применить принцип Energy

Multiplier (EM^2) для получения нового топлива, которое будет использоваться повторно на заводе-изготовителе. Для запуска реакции деления применить т.н. «запал нейтронов». С целью уменьшения массогабаритных характеристик активную зону надо соединить в единый модуль с турбокомпрессорной установкой. И получим, т.н. «атомный двигатель» [2] - компактную фико-энергетическую машину, которая атомную энергию, выделяемую в результате деления ядер тяжелых элементов под действием нейтронов, преобразует в механическую энергию вращения вала. Сверхкритическое давление теплоносителя для получения высокого к.п.д. надо создавать в герметичном корпусе, где будут размещены и активная зона, и турбокомпрессор, а не только компрессором, как сделано на авиационных турбинах в разведённых компоновках. Для уменьшения массогабаритных характеристик энергоблока нужно применить высокооборотистые и турбокомпрессор, и электрогенератор, например на 400 Гц переменного тока с оборотами вала 24000 об/мин. Это значительно (в 8 раз) снизит размеры энергоблока, а если требуется переменное напряжение 50 Гц, то его легко получить из постоянного тока (выпрямленного 400 Гц) с помощью полупроводникового конвектора непосредственно перед потребителем. Соединив «атомный двигатель» вертикального исполнения с электрогенератором получим вертикальный энергоблок, который будет легко охлаждать естественной циркуляцией воздуха. Соединение выходного вала «атомного двигателя» с валом электрогенератора сделаем через инерционную муфту, которая обеспечит плавную раскрутку ротора электрогенератора при пуске, а в случае короткого замыкания временно разъединит вал генератора от вала двигателя до устранения замыкания. В случае короткого замыкания в нагрузке (скачкообразное уменьшение электрического сопротивления нагрузки) реактор должен автоматически быстро сбросить мощность и перейти в режим вентиляции активной зоны. При этом не исключается одновременная работа системы защиты активной зоны от расплавления ядерного топлива путём высыпания шаровых твэлов из активной зоны. При этой ситуации получится, кто быстрее сработает, или активная зона перегреется и шаровые твэлы высыпятся в контейнеры пассивного охлаждения, или быстро снизится тепловая мощность активной зоны, и режим вентиляции обеспечит её дальнейшую работу. При коротком замыкании обороты выходного вала двигателя уменьшатся, и вал ротора электрогенератора с помощью инерционной муфты автоматически отсоединится от вала двигателя.

Для реализации пассивного охлаждения, т.е. естественной циркуляцией воздуха без потребления электроэнергии, энергоблок должен иметь вертикальную компоновку с ребрами охлаждения. Исходя из этого, энергоблок должен быть помещён в трубу, в которой организован восходящий поток воздуха за счет теплового напора, который

должен создаваться самим энергоблоком. В нижней части этой трубы должен быть размещён электрогенератор, который имеет меньшее тепловыделение и его температура ограничена 100 °С, а в верхней части трубы должен быть размещен атомный блок, корпус которого может нагреваться до 350 °С, и нагревает воздух, за счёт чего и создаётся тяга в трубе. Исходя из изложенного логично получается следующее компоновочное решение вертикального энергоблока для Сахары, т.н. «жаркой ядерной батарейки», см. рис. 1.

На рис. 1 показаны только основные узлы вертикального энергоблока, где: 1 - корпус атомного блока; 2 - блок аппаратуры и приводов СУЗ; 3 - стержни СУЗ; 4 - периферийная часть активной зоны (начальный подогрев теплоносителя); 5 - сердцевинная часть активной зоны (окончательный подогрев теплоносителя перед турбиной); 6 - жидкометаллический свинцовый экран от нейтронов; 7 - система защиты активной зоны от перегрева и высыпания шаровых твэлов в контейнеры пассивного охлаждения поз. 10; 8 - газовая высокооборотная высокотемпературная турбина; 9 - трехзаходный высокооборотный центробежный компрессор; 10 - три контейнера пассивного охлаждения шаровых твэлов по окружности корпуса атомного блока; 11 - механизированный герметичный разъёмный фланец; 12 - корпус электрогенератора; 13 - электрогенератор; 14 - антисейсмический амортизатор; 15 - ребра охлаждения корпуса электрогенератора; 16 - подшипник вала электрогенератора; 17 - газ заполнения корпуса электрогенератора; 18 - центробежная муфта; 19 - сальник и подшипник выходного вала атомного двигателя; 20 - газ - рабочее тело атомного двигателя; 21 - выхлоп газовой турбины; 22 - теплообменник рабочего для сброса тепла через стенку атомного блока; 23 - усилители теплоотвода; 24 - горячий поток рабочего тела; 25 - охлажденный поток рабочего тела; 26 - ребра охлаждения реакторного блока; 27 - ребра охлаждения приборного бока.

Для охлаждения вертикального энергоблока придумана следующая схема, которая изображена на рис. 2. Где: 1 - вытяжная труба; 2 - бетонная опора трубы; 3 - крюк для установки и извлечения энергоблока; 4 - стакан охлаждения энергоблока; 5 - трубы подачи воздуха в стакан; 6 - ребра охлаждения энергоблока; 7 - грунт (песок). Стрелками показано движение воздуха охлаждения энергоблока. Для установки и извлечения энергоблока из стакана вытяжная труба смещается в сторону по полозьям на бетонной опоре. Одновременно труба используется как стойка крана, который осуществляет вертикальное перемещение энергоблока в стакан и обратно. Детальные подробности на рис. не указаны.

Принцип работы понятен из рисунка. В стакане 4 воздух нагревается от корпуса и ребер 6 энергоблока и поднимается вверх по вытяжной трубе 1 и выходит на высоте Н

трубы в атмосферу. На место нагретого воздуха по трубам 5 поступает свежий воздух с температурой 85 °С. Расход воздуха в стакане охлаждения между ребрами охлаждения энергоблока определяется статическим напором Δh_c между горячим воздухом в трубе и холодным воздухом атмосферы вокруг трубы. Самотяга трубы Δh_c (Па), вычисляется как $\Delta h_c = (\rho_v - \rho_g) * g * H$ [4, стр.24], где ρ_v – плотность окружающего трубу воздуха, кг/м³; ρ_g – плотность воздуха в трубе; g – ускорение свободного падения, м/с²; H (м) – определим для первого приближенного расчета исходя из разумных размеров 50 м.

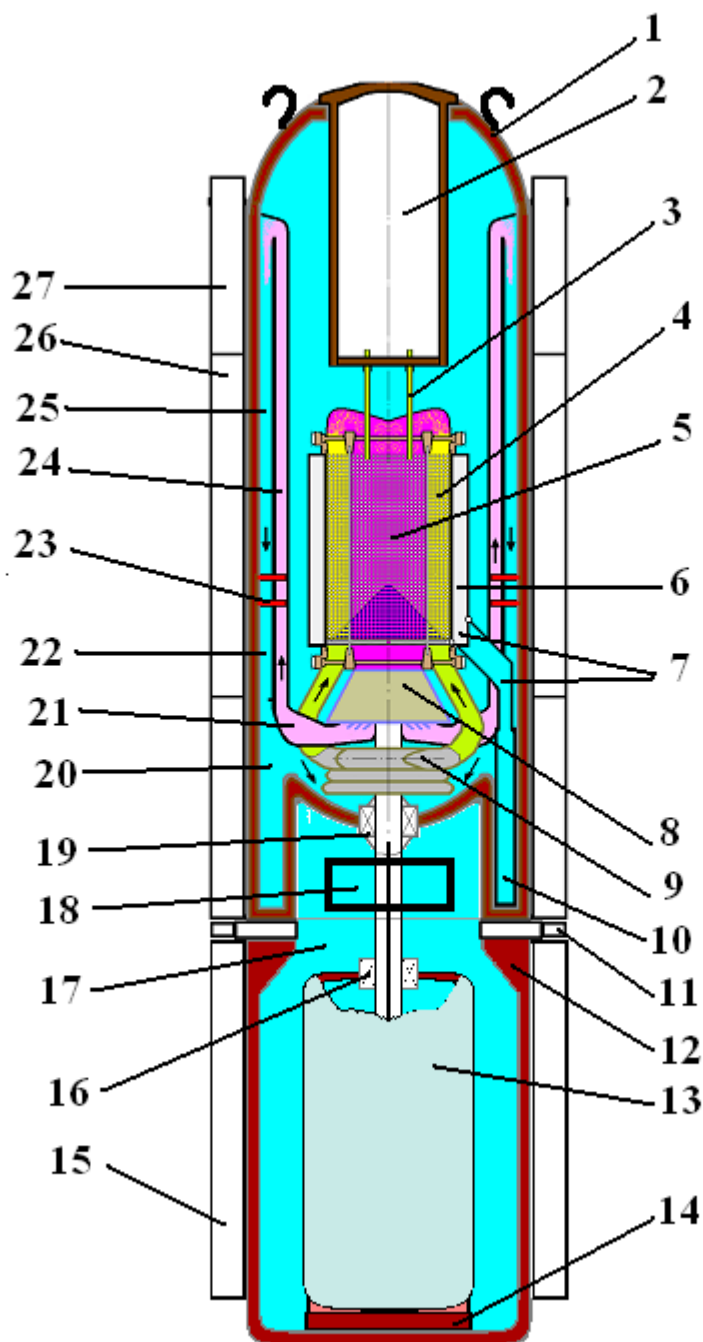


Рис. 1.

Для расчета количества тепла, которое можно снять с корпуса атомного двигателя и электрогенератора, предложена на рис. 3 следующая схема естественной циркуляции воздуха. Конечно, для расчета такой схемы будет применён в кодах CFD современный способ, но это потребует около месяца времени, если топ-ЭВМ сможет работать (сломалась, нет запасных плат, кончилась дорогая западная лицензия за \$30 млн., и т.д. и т.п., и главное, «ядерные батарейки» у руководства по всей вертикали ГК Росатом не в почете).

Мы сделаем расчет за 30 минут старым методом по критериям подобия [4,6], как делают студенты в Excel, и будем уже сейчас сразу знать примерно, какую электрическую мощность можно получить от «жаркой ядерной батарейки» в пустыне Сахара.

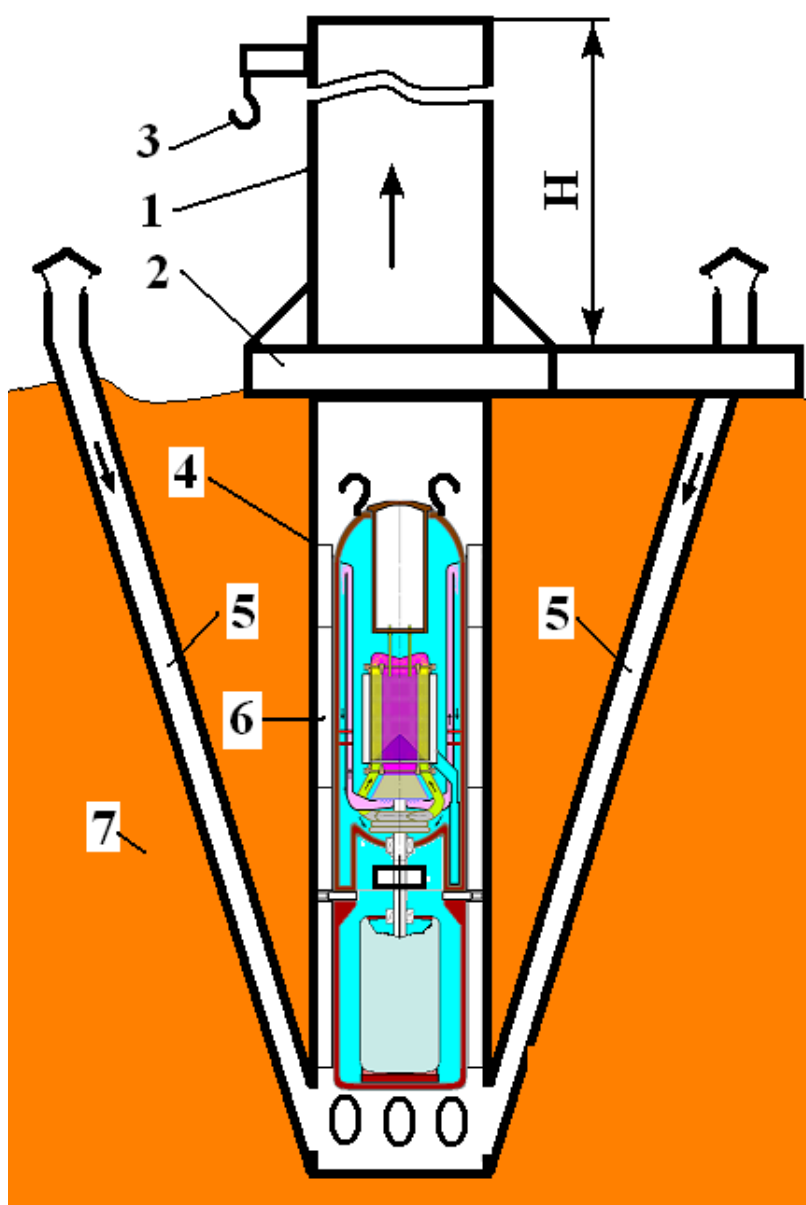


Рис. 2.

Задаёмся геометрическими первичными размерами энергоблока, см. рис. 3:

Длина корпуса энергоблока $L = 8$ м;

Толщина ребра охлаждения $ht = 0,02$ м;

Высота ребра охлаждения $hv = 0,4$ м;

Диаметр корпуса энергоблока с ребрами $D_r = 2,3$ м;

Внутренний диаметр стакана охлаждения $D_{кв} = 2,32$ м;

Шаг между ребрами по хорде на корпусе энергоблока $S = 0,03$ м

Площадь проходного сечения канала f (см. рис.3) = $0,0215$ м²

Количество каналов (или ребер) по периметру корпуса - 94;

Температура воздуха на уровне земли и перед каналами $t_{вхк} = 85$ °С;

Допустимая средняя температура материала ребер охлаждения энергоблока = 350 °С,
далее см. табл. 2.

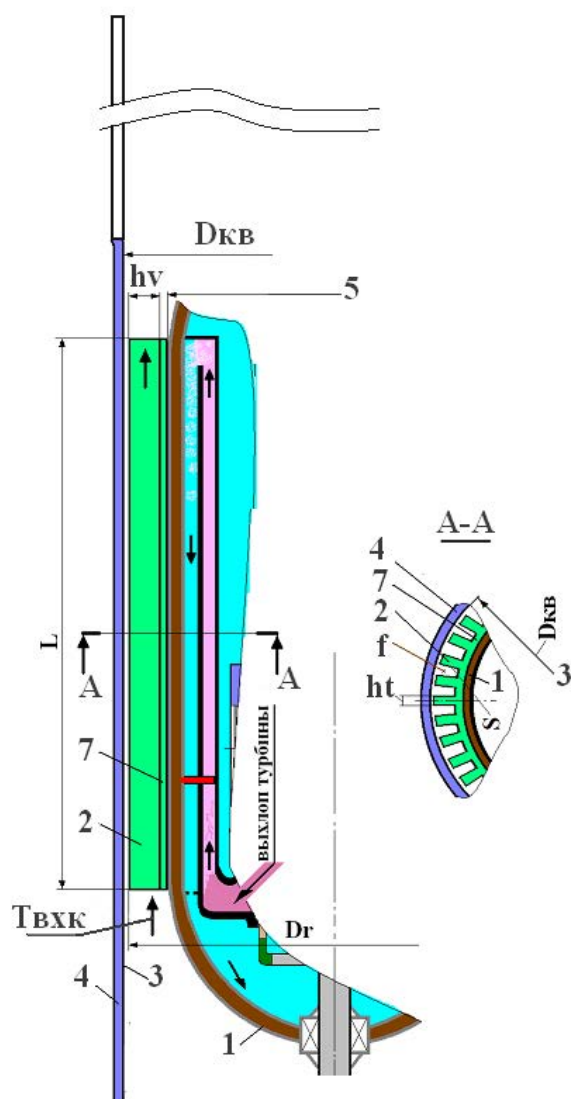


Рис. 3.

Чтобы не учитывать в первом приближении потери напора в трубах 5, подающих свежий воздух, и в вытяжной трубе 1, зададим площадь их проходного сечения в 2 раза больше площади суммы каналов f между ребрами. Таким образом, можно будет считать, что весь напор самотяги трубы приложен к участку охлаждения поверхности энергоблока.

В штатном режиме работы энергоблока в каналах охлаждения f , см. рис.3, между ребрами струя воздуха имеет установившееся движение (скорости, ускорения и давления не зависят явно от времени). Логично предположить, что расход воздуха примерно распределится равномерно между всеми 94 каналами охлаждения f . Следовательно, можем применить для струи воздуха в каналах f уравнение Даниила Бернулли стр. 373 том 1 [5]:

$$v^2/2g + p/\gamma + z = \text{const}, \text{ где}$$

γ - удельный вес газа кг/м³, для воздуха сухого [3, стр.373]

$$= 1,293 \text{ при } 0^\circ\text{C и } 760 \text{ мм.рт.ст.} = \mu/22,4 ;$$

$$= 1,186 \text{ при } 15^\circ\text{C и } 1 \text{ атм} = \mu /24,4 \text{ (}\mu \text{ - молекулярный вес} = 28,96\text{)}.$$

$v^2/2g$ - скоростной напор [м];

p/γ - высота, соответствующая давлению (пьезометрическая высота) [м];

Z - высота возвышения струи газа над координатной плоскостью сравнения [м].

Пренебрегая потерями напора на входных трубах свежего воздуха, поворотах и т.п.

Получим:

$\rho \cdot v^2/2g = \Delta h_c = (\rho_v - \rho_g) \cdot g \cdot H$ [Па = Н/м² = кг/с²·м], где ρ - средняя плотность воздуха в канале f между ребрами [кг/м³] = $(1+0,566)/2 = 0,783$ (на самом деле плотность будет меньше).

Откуда вычисляем скорость v в канале f при высоте трубы 50 м.

$$v^2 = ((\rho_v - \rho_g) \cdot g \cdot 2 \cdot g \cdot H) / \rho = ((1-0,566) \cdot 9,81 \cdot 2 \cdot 9,81 \cdot 50) / 0,783 \text{ [Па]} = 0,434 \cdot \dots = 4176,6/0,783 = 5334 \text{ корень} = 73 \text{ м/с}.$$

А если высота трубы $H=20$ м, то $=1670,64$ $v = 41$ м/с - см. расчет в таблице для 20 м высоты трубы. Возможно, нужна ещё коррекция перераспределения потока воздуха. Результаты расчета приведены в табл. 2. Данные по свойству воздуха приведены в табл. 1.

Таблица 1.

Параметр	Размер.	10	40	60	70	80	350
		°C	°C	°C	°C	°C	°C
Плотность воздуха на уровне земли ρ	кг/м ³	1,247	1,128	1,06	1,029	1	0,566

Удельный вес воздуха = $\rho \cdot g$	кГ/м ³	12,23				9,81	5,55
Давление воздуха на уровне земли $\rho \cdot 10^5$	Па	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01
Динамическая вязкость воздуха, $\mu \cdot 10^6$	Па*с	17,6	19,1	20,1	20,6	21,1	31,4
Кинематическая вязкость воздуха, $\nu \cdot 10^6$	м ² /с	14,16	16,96	18,97	20,02	21,09	55,46
Удельная теплоёмкость воздуха, Ср	Дж/ (кг*град)	1005	1005	1005	1009	1009	1050
Теплопроводности воздуха, $\lambda \cdot 10^2$	Вт/ (м*град)	2,51	2,76	2,9	2,96	3,05	4,91
Критерий т/ф подобия Прандтля, Pr	-	0,707	0,699	0,696	0,694	0,692	0,676

Таблица 2.

АТОМНЫЙ ДВИГАТЕЛЬ для мини-АЭС в жарком климате	Вариант	АДВ-30
Объём	м ³	33,20
Вес корпуса АДВ	тонн	5,80
Вес ядерного топлива и активной зоны АДВ	тонн	7,00
Вес турбины - компрессора	тонн	5,00
Вес ребер охлаждения	тонн	16,24
Вес АДВ в целом	тонн	34,04
МАКСИМАЛЬНАЯ тепловая мощность примерно	МВт	40,00
МАКСИМАЛЬНАЯ ЭЛЕКТ. МОЩ-НОСТЬ при к.п.д. 50%	МВт	20,00
Диаметр корпуса АДВ	м	1,50
Длина корпуса АДВ	м	8,00
Толщина ребра охлаждения	м	0,02
Высота ребра охлаждения	м	0,40
Диаметр корпуса АДВ с ребрами	м	2,30
Внутренний диаметр короба	м	2,32
Зазор между торцом ребра и внутр. поверхностью короба	м	0,01
Шаг между ребрами по хорде на корпусе	м	0,03
Шаг между ребрами по хорде на коробе	м	0,08
Площадь ребра по 3-м сторонам	м ²	6,56
Площадь сброса тепла на всех ребрах	м ²	616,64
Площадь сброса тепла всего с поверхности	м ²	639,20
Длина смоченного периметра сечения канала	м	0,887
Диаметр эффект. канала dэ	м	0,0969
Площадь проходного сечения канала f	м ²	0,0215
Количество каналов (или ребер) по периметру корпуса	шт	94
Ширина сечения входа воздухозаборника	м	3
Скорость воздуха перед каналами	м/с	41
Расход воздуха через воздухозаборники на уровне земли	кг/с	82,86
Перевод темп-ы в гр. Кельвинов из Цельсия	К	гр.С + 273,15
Температура воздуха на уровне земли перед каналами tвхк	гр. С	85
Температура воздуха перед каналами Твхк	гр. К	358,15
Средняя температура стенки канала Тст	гр. К	623,15
Средняя температура воздуха в канале Тср	гр. К	490,65
Средняя скорость воздуха ω в канале	м/с	41,00
Плотность воздуха ρ на уровне земли при темпер. 80 гр.С	кг/м ³	1
Давление воздуха на уровне земли ρ*10 ⁵ (из таблицы)	Па	1,01
Коэффициент объемного расширения β = 1/ Тср	1/гр.К	0,002038113

Динамическая вязкость воздуха $\mu = \nu * \rho$	кг/м*с	0,000021090
Кинематическая вязкость воздуха ν при 80 гр.С (из таблицы)	м2/с	0,00002109
Теплопроводность воздуха λ при темп. 70 гр.С	Вт/м*К	0,0305
Теплоёмкость воздуха C_p при +80 гр.С (из таблицы)	Дж/кг*К	1009
Критерий теплофизич. подобия Прандтля при +80 гр.С (табл)		0,692
Критерий теплофизич. подобия Прандтля $Pr = \mu * C_p / \lambda$	(вычисл.)	0,698
Число Рейнольдса потока в проход.сеч.Канала $Re = d \omega / \nu$		188378,38
Критерий теплового подобия Нуссельта турбулентный (ур.6)	вар.11	283,54
С.С.Кутателадзе Нуссельт 2100 Re 10000 при Pr любом	вар.12	1994,99
В.Д.Попов Нуссельт 2100 Re 10000 при Pr 140		3818,24
Б.Ц.Хаузена Нуссельт 2100 Re 100000 при Pr любом	вар.13	335,53
Кэф. изменения среднего кэф. теплопередачи F от $(=L/d \epsilon)$.	м/м	82,56
ϵ учитывает изм. Сред. коэффициента теплоотдачи по длине	F бол. 50	1
Коэффициент теплоотдачи $\alpha_1 = Nu * \lambda / d \epsilon$	вар.11	89,25
Коэффициент теплоотдачи $\alpha_1 = Nu * \lambda / d \epsilon$	вар.12	627,94
Коэффициент теплоотдачи $\alpha_1 = Nu * \lambda / d \epsilon$	вар.13	105,61
Тепловой поток отдаваемый в охлажд.возд. $(T_{ст}-T_{ср}) * a_1 * S$	вар.11	15117271,50
	вар.12	106365147,70
	вар.13	17889041,42
Вар.11 Сброс тепла МВт	МВт	15,12
Вар.12 Сброс тепла МВт	МВт	106,37
Вар.13 Сброс тепла МВт	МВт	17,89
Если тепловую мощ. держать на уровне 30 МВт, то сможем сбросить Σ 15 МВт тепла		

При к.п.д. 50 % электрическая мощность может быть 10-15 МВт

Вывод:

Естественной циркуляцией можно добиться электрической мощности энергоблока «Жаркая ядерная батарейка» около 10-15 МВт эл. при температуре окружающего воздуха 85 °С в пустыни Сахара без воды. Идея экономически очень выгодная, а применяя её для месторождения можно государству покупателю расплачиваться будущим добытым сырьем с месторождения. Эта финансовая схема реальна и очень выгодна для покупателя и продавца. Рынок продаж не исчерпаем, потребность 5 МВт эл. блоков высокая. В то время как, текущие объемы по продаже больших атомных энергоблоков рискуют в будущем сильно сократиться. «Известия» изучили некоторые перспективы развития рынка атомной энергетики [7].

Для студентов это достойная похвалы тема для их дипломных и курсовых проектов.

Более точные результаты дадут расчеты в CFD кодах, правда, различия по ранее выполненным расчетам «Летающей мини-АЭС»[8] не дали большой разницы. Я не гонюсь на данном этапе разработки идеи за оптимизацией энергоблока, за проценты выгоды, меня интересует выгода в разы, поэтому и закладываем коэффициента запаса 1,5 - 2-х кратные.

Виноградов Андрей.

ССЫЛКИ

1. [04/09/2023] PРоAtom. Новое в энергетике и атомной промышленности за 2023год. Академик Олег Фиговский, Израиль.
2. [03/09/2019] «Атомный двигатель Виноградова» (2018 год). А. А. Виноградов, к.т.н., главный конструктор проектов НАО «СИЛА ОКЕАНОВ».
3. Якопо Буонджорно проф. ядерной инженерии MIT США: - «Микрореакторы могут полностью изменить правила игры в атомной отрасли», «Атомная энергия 2.0» (А 2.0 Э), Интервью 15 июля 2021.
4. Грибков А.М Выбор оптимальных размеров дымовых труб и внешних газоходов. Казан. гос. энерг. ун-т, 2016. – 83 с.
5. Астафьев А.Ф., проф. Инженерная справочная книга. ОНТИ НКТП СССР. Ленинград -Москва, 1937. Том 1 и 2.
6. Степанов О. А. Тепловой и гидравлический расчет теплообменного аппарата воздушного охлаждения: методические указания для студентов специальности 140104"Промышленная теплоэнергетика" к курсовой работе по "Теоретическим основам теплотехники". - Тюмень: РИО ГОУ ВПО ТюмГАСУ, 2009. – 41 с.
7. Битва ядерных компактов_ рыночные перспективы малых АЭС _ Статьи _ Известия. 9 января 2019. pdf
8. 8. PРоAtom - Летающая мини-АЭС мощностью до 30 МВт эл. от 13.04.2023.pdf