

Tk 25. 141

KFKI 9/1963

ЦЕНТРАЛЬНЫЙ ИНСТИТУТ ФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ  
ВЕНГЕРСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК  
БУДАПЕШТ



И. Сентдьерди

ВОЗМОЖНОСТИ УВЕЛИЧЕНИЯ МОЩНОСТИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО  
ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА НА 2 МВт ТИПА ВВР-С

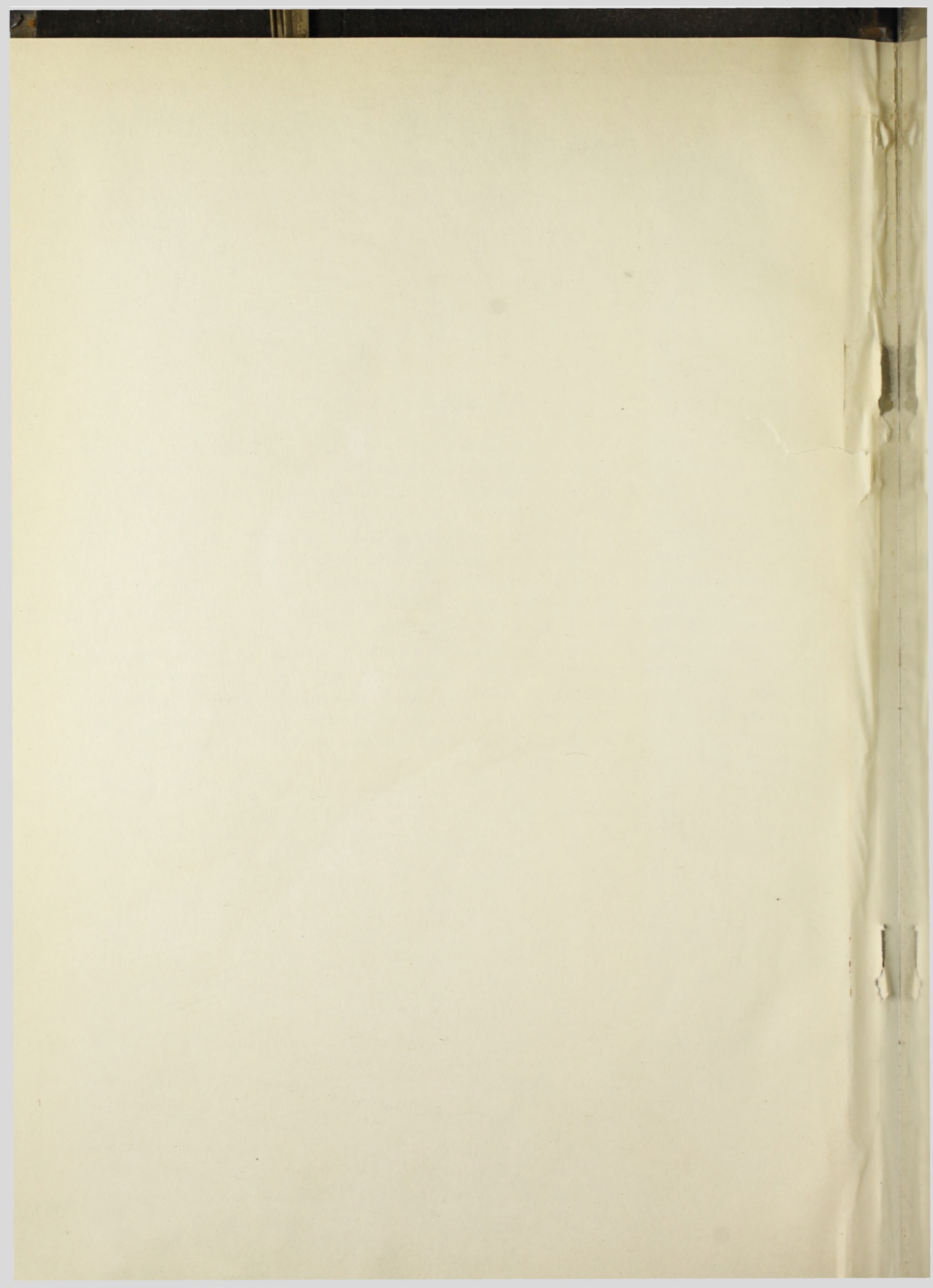
1963

2017

### Р Е З Ю М Е

С точки зрения проведения физических экспериментов и ускорения производства изотопов желательно было бы увеличить мощность реактора типа ВВР-С от 2 Мвт до 10 Мвт. В настоящее время почти единственным препятствием является то, что тепловую мощность ТВЭЛ-ов нельзя или только в незначительной степени можно увеличить из-за имеющегося конвективного метода охлаждения.

В этой статье излагаются теплотехнические вопросы увеличения мощности и в рамках вышеуказанного, в первую очередь, возможностями применения поверхностного кипения. Хотя в приложении 2 даётся литературное резюме о коррозии алюминия, мы здесь не занимаемся разными технологическими вопросами, так например деформацией ТВЭЛ-ов, вызванной тепловой нагрузкой, коррозией поверхности, проблемами жесткости ТВЭЛ-ов, защитой от излучения, вторым контуром охлаждения, и т.д. Желательно отметить, что в случае устранения теплотехнических препятствий увеличение мощности может быть испытано только после подробного, всестороннего рассмотрения вышеуказанных вопросов. В приложении I даётся резюме о поверхностном кипении.



Возможности увеличения мощности экспериментального  
ядерного реактора на 2 Мвт типа ВВР-С

И. Сентдьерди

Центральный Институт Физических Исследований, Будапешт

Теплоотдачу ТВЭЛ-ов с тепловой мощностью можно записать в следующем виде:

$$Q = h F (t_w - t_f) \quad \text{ккал/м}^2 \text{ час}$$

или относительно единицы поверхности, следующим образом

$$q = h (t_w - t_f) \quad \text{ккал/м}^2 \text{ час}$$

Учитывая теплоотдачу, вызываемую охлаждением тепловая мощность ТВЭЛ-а или реактора может быть увеличена изменением любых из членов  $h, F$  и  $(t_w - t_f)$

1./ Повышение мощности путём увеличения фактора теплоотдачи  $h$

Коэффициент теплоотдачи по уравнению Дитуса-Балтера имеет следующий вид:

$$h = 0,023 \frac{k}{d_e} \left( \frac{d_e v}{\nu} \right)^{0,8} \left( \frac{\nu}{\alpha} \right)^{1/3}$$

Если в случае повышения мощности реактора ВВР-С температура первого контура охлаждения изменилась бы только на несколько  $^{\circ}\text{C}$ , изменение физических факторов незначительно, поэтому, если геометрия зоны - не изменится, только с изменением скорости охлаждающей воды можем увеличить коэффициент теплоотдачи.

Скорость охлаждающей воды в реакторе ВВР-С вокруг ТВЭЛ-ов может быть увеличена или программированием потока, / вдоль ТВЭЛ-ов с малой тепловой нагрузкой на конце кассет расположены сужители для уменьшения скорости потока, а посередине ТВЭЛ-ов на участке наибольших тепловых нагрузок расположены сужители для увеличения скорости потока/ или установкой насосов с большей мощностью. Количество охлаждающей воды в реакторе ВВР-С с помощью дросселирования установлено назначение  $900 \text{ м}^3/\text{час}$ , при отсутствии дросселирования же - может увеличиться до  $1050 \text{ м}^3/\text{час}$ . Увеличение скорости потока является ограниченным из-за относительно малой прочности ТВЭЛ-а типа ЕК-10, поэтому тепловая мощность реактора ни в коем случае не может повышаться в значительной мере.

2./ Увеличение поверхности ТВЭЛ-ов

Предполагая коэффициент теплоотдачи постоянным или в незначительной мере изменяющимся/ с изменением размеров изменяется и коэффициент теплоотдачи/ мощность может быть увеличена пропорционально увеличению поверхности ТВЭЛ-ов. Рационально увеличить мощность путём увеличения поверхности можно такими ТВЭЛ-ами, у которых отношение поверхности ТВЭЛ-а к объёму делящегося материала лучше, чем у ТВЭЛ-а типа ЕК-10. Мощность реактора очень эффективно увели-

чивается применением ТВЭЛ-ов, которые имеют форму кольца кругового сечения, тонкого листа, тонкостенного кольца и ребристого стержня или ребристого листа. Увеличение мощности реактора любыми типами перечисленных ТВЭЛ-ов потребовало бы замену не только ТВЭЛ-ов, но и по существу всей зоны, и хотя такой путь очень эффективен, в тоже время потребовал бы больших расходов.

### 3./ Увеличение разности температур / $t_w - t_f$ / между поверхностью ТВЭЛ-а и охлаждающей жидкости

При конвективном охлаждении температуру охлаждающей жидкости определяет температура охлаждающей воды первичного контура, а температуру поверхности ТВЭЛ-а определяет температура насыщения охлаждающей воды. Над активной зоной находится слой воды высотой примерно 4 м, вследствие этого давление охлаждающей воды, обтекающей ТВЭЛ-ы, находящихся в зоне примерно 1,4 атм., а температура насыщения примерно 109°C. По подлинной документации максимальная температура наиболее нагруженной поверхности ТВЭЛ-а - 92°C. Как видно, существует возможность для увеличения разности температур, а вследствие этого можно увеличить мощность реактора примерно на 30%. Следует отметить, что если температура поверхности достигнет величины насыщения, то пузырьки ещё не образуются, так как для образования пузырьков необходим перегрев поверхности.

Если из трёх вышеперечисленных методов пропустим увеличение поверхности / если ТВЭЛ-ы не будут заменены/, то помимо увеличения скорости и температуры ТВЭЛ-а можно располагать ещё и тем запасом, который получается из теплотехнических расчётов подлинной документации. При теплотехническом расчёте ТВЭЛ-а предположили, что теплоотдача происходит с внутренней стенки трубы эквивалентным диаметром  $d_1$ . Действительнее всего будет то предположение, что теплоотдача происходит с внешней поверхности ТВЭЛ-а в пространстве кольцевого сечения. Этот факт видоизменяет уравнения Дитуса-Бэлтера тем, что полученный коэффициент теплоотдачи следует умножить на величину  $\left(\frac{d_2}{d_1}\right)^{0,45}$ , где  $d_2$  - внутренний диаметр наружного кольца кольцевого сечения охлаждающего канала,  $d_1$  - диаметр ТВЭЛ-а. Вышесказанное подтверждает и то, что в реакторе типа ВВР-С измеренная температура ТВЭЛ-ов типа ЕК-10 оказалась существенно ниже рассчитанной. /1/.

### 4./ Теплообмен поверхностным кипением

При теплообмене поверхностным кипением характер теплоотдачи существенно изменится, коэффициент теплоотдачи может увеличиться чуть ли не на два порядка, поэтому такой метод теплоотдачи пригоден для увеличения мощности реактора. Подобным описанием поверхностного кипения здесь не занимаемся, краткое обобщение об образовании поверхностного кипения и кривой кипения даётся в приложении I. В дальнейшем рассматривается увеличение мощности реактора ВВР-С исключительно методом поверхностного кипения. При применении поверхностного кипения мы намерены изучить следующее:

а./ температурные условия ТВЭЛ-ов, по сравнению с конвективным охлаждением мощностью 2Мвт;

- б./ запас ТВЭЛ-ов от перегорания;
- в./ влияние пузырьков на реактивность;
- г./ загрязнение ТВЭЛ-ов;
- д./ вибрация ТВЭЛ-ов;
- е./ аварийная защита.

а/ Температурные условия в ТВЭЛ-ах реактора типа ВВР-С при охлаждении поверхностным кипением мощностью 10 Мвт и конвективным охлаждением мощностью 2 Мвт

В активной зоне ядерных реакторов выделение тепла пропорционально нейтронному потоку. Нейтронный поток в зоне не одинаков, в центре зоны больше, чем по краям. Отражатель и регулирующие стержни тоже влияют на распределение потока. По подлинной документации максимальная тепловая мощность реактора получается умножением средней мощности на коэффициенты неравномерности - аксиальный ( $\eta_t = 1,3$ ) и радиальный ( $\eta_r = 1,54$ )

$$N_{\text{макс.}} = \eta_r \eta_t N_{\text{ср.}}$$

С точки зрения теплотехники критическим является максимальная тепловая нагрузка самого нагруженного ТВЭЛ-а, поэтому при дальнейших расчётах мы будем заниматься только этим.

Теплотехнические условия при тепловой мощности 2 Мвт /По подлинной документации/

Максимальная мощность наиболее нагруженных ТВЭЛ-ов

$$N = 6,89 \text{ Квт}$$

а максимальная тепловая мощность

$$Q = 860 N = 5900 \text{ ккал/м}^2\text{час}$$

максимальный тепловой поток при такой тепловой мощности

$$q = 0,378 \cdot 10^6 \text{ ккал/м}^2\text{час}$$

Средняя температура охлаждающей жидкости /при первично входной температуре охлаждающей воды первичного контура  $34^\circ\text{C}$  и при скорости жидкости  $1,75\text{м/сек}$  /

$$t_k = 37,25^\circ\text{C}$$

Разность температуры между стенкой ТВЭЛ-а и охлаждающей воды

$$\Delta t = 54^\circ\text{C}$$

Максимальная температура стенки ТВЭЛ-а

$$t_w = t_k + \Delta t = 91,25^\circ\text{C}$$

Падение температуры в оболочке ТВЭЛ-а

$$\Delta t_b = 5,6^\circ\text{C}$$

Падение температур в делящемся материале

$$\Delta t_f = 37,8^\circ\text{C}$$

Максимальная температура в центре ТВЭЛ-а (фиг.1а)

$$t_f = t_w + \Delta t_b + \Delta t_f = 134,65^\circ\text{C}$$

Значит, температура поверхности максимально нагруженных ТВЭЛ-ов реактора ВВР-С будет  $92^\circ\text{C}$ . Эта температура меньше температуры насыщения охлаждающей воды и поэтому исключается возможность того, что на какой-либо из точек поверхности ТВЭЛ-а происходит парообразование. Общепринятое то ошибочное мнение, что максимальная температура поверхности ТВЭЛ-а потому должна быть хотя бы на  $8^\circ\text{C}$  ниже температуры кипения охлаждающей воды, чтобы на поверхности ТВЭЛ-а даже случайно не мог образоваться пар, потому что образовавшийся пар обладает плохой теплопроводностью и снижает теплоотдачу, стенка перегревается, более того, может расплавиться, такой взгляд совершенно ошибочный, ибо образующиеся на поверхности пузырьки, если они застаивались бы, то ухудшили бы теплоотдачу, но в действительности за очень короткое время после образования пузырька, он отделится от поверхности, что приводит в движение пограничный слой и в большой степени улучшает теплоотдачу /2/. Пузырёк, образующийся на поверхности только в том случае не отделяется от неё, если тепловая нагрузка поверхности очень мала и нет течения жидкости, в таком случае из-за малой тепловой нагрузки присутствие пузырька не сопровождается никакой опасностью.

Из кривой теплоотдачи наиболее нагруженного в тепловом отношении ТВЭЛ-а ВВР-С и кривой кипения (фиг.2) видно, что начало образования пузырьков на поверхности ТВЭЛ-а начинается при температуре поверхности  $125-130^\circ\text{C}$ . Значит, мощность можно было увеличить в полтора раза /до 3 Мвт/ без того, чтобы на поверхности ТВЭЛ-а началось образование пузырьков. Температура оболочки ТВЭЛ-а при полуторной мощности будет:

$$t_{w/3\text{МВт}} = t_{w/2\text{МВт}} + 1/2 \Delta t = 124^\circ\text{C}$$

Из фиг.2 видно, что в случае поверхностного кипения в большей мере улучшаются условия теплоотдачи, чем в случае конвективной теплоотдачи. Например, охлаждающая вода, протекающая со скоростью 1,75 м/сек может отводить с поверхности тепловой поток  $0,5 \cdot 10^6$  ккал/м<sup>2</sup>час с разностью температур  $70^\circ\text{C}$ , а в случае поверхностного кипения тепловой поток  $0,5 \cdot 10^6$  ккал/м<sup>2</sup>час увеличивает температуру поверхности всего лишь на  $3^\circ\text{C}$ .

Вслучае поверхностного кипения качественное улучшение теплоотдачи приводит к тому, что тепловая нагрузка ТВЭЛ-а при увеличении тепловой мощности до 10 Мвт в реакторе ВВР-С, будет следующая:

$$q_{10\text{МВт}} = 5q_{2\text{МВт}} = 1,89 \cdot 10^6 \text{ ккал/м}^2\text{час,}$$

а максимальная температура ТВЭЛ-а была бы всего лишь  $140-142^\circ\text{C}$  /фиг.2/.

Данные кривой кипения взяты по /3/, в то же время нужно отметить, что и наши измерения совпадают с этими данными. Перепад температуры в оболочке ТВЭЛ-а в урановом стержне в случае пятикратного увеличения мощности



$$5/ \Delta t_b + \Delta t_f / = 217^{\circ}\text{C}$$

Так как диаметр делящегося материала в ТВЭЛ-е не тот, что указан в документации, а равен 7 мм, то перепад температуры в делящемся материале больше, а в алюминиевой оболочке меньше -  $1/\Delta t_b$ , т.е.  $\Delta t_f$  ,/

$$5/ \Delta t_b , + \Delta t_f , / = 275^{\circ}\text{C}$$

значит, температура оси ТВЭЛ-а будет:

$$t_{w/10Mbm} + 5/\Delta t_b' + \Delta t_f' / = 415^{\circ}\text{C} \quad (\text{фиг.1б})$$

В тепловом расчёте ТВЭЛ-а учитывалось контактное термическое сопротивление, возникающее между урановым стержнем и оболочкой, поэтому, в действительности температура оси ТВЭЛ-а больше рассчитанной.

#### б) Запас ТВЭЛ-ов от перегорания

В случае поверхностного кипения при увеличении теплового потока мы приходим к такому значению /рис.3 точка С/, когда на поверхности ТВЭЛ-ов пузырьки начинают так густо и часто образовываться, что в конце концов они сливаются в плёнку и из-за плохого коэффициента теплоотдачи плёнки, образующейся на поверхности, температура поверхности ТВЭЛ-а скачкообразно увеличивается. Скачок температуры может дойти до ста, более того - до тысячи  $^{\circ}\text{C}$  и в таких случаях может расплавиться не только оболочка ТВЭЛ-а, но и сам ТВЭЛ. Во время эксплуатации реактора критический тепловой поток нужно избежать с надлежащей надёжностью. Величина запаса естественно зависит от конструкции реактора, от постоянной времени, системы защиты и т.д. По В.Р.Мартини /4/ критический тепловой поток должен быть хотя бы в два раза больше, чем рабочий тепловой поток.

Величину рабочей тепловой нагрузки кипящего реактора Бонус приняли равной половине значения критического теплового потока /5/. В реакторе Боракс V запас меньше двух ( $j = 1,66$ ), даже, более того, на основании результатов дальнейших измерений они и эту величину хотят снизить /6/.

Величина критического теплового потока в первую очередь зависит от скорости охлаждающей среды и от степени недогрева. / Зависимость от размера канала, от шероховатости поверхности, и т.д. незначительная, поэтому ею мы пренебрегаем/.

Для расчёта критического теплового потока самыми подходящими являются следующие, опытно проведенные соотношения:

$$1. q_b = /400000 + 4800 \Delta T_2 / \cdot \frac{1}{5} \quad /7/$$

$$2. \gamma = 0,0135 X \quad /фиг.4/ \quad /9/$$

Подставляя в уравнение /7/ и /8/ скорость жидкости равной 1,75м/сек и недогрев  $\Delta T_2 = 65^{\circ}\text{C}$  /температура насыщения охлаждающей среды  $109^{\circ}\text{C}$ , нами

предписанная средняя температура охлаждающей воды  $44^{\circ}\text{C}$  и пересчитая с английских единиц на метрические, получим следующие величины:

$$q_b / I / = 4,62 \cdot 10^6 \text{ ккал/м}^2 \text{ час}$$

$$q_b / 2 / = 5,45 \cdot 10^6 \text{ ккал/м}^2 \text{ час}$$

Примерно такие же величины получим из 5 диаграммы в случае скорости жидкости  $1,75 \text{ м/сек}$  и недогрева  $\Delta T_2 = 65^{\circ}\text{C}$  /9/

$$q_b / 3 / = 5,60 \cdot 10^6 \text{ ккал/м}^2 \text{ час}$$

Для контроля результатов этих трёх измерений мы сами проводили измерения критического теплового потока в дистиллированной воде атмосферного давления со скоростью потока  $1,75 \text{ м/сек}$  и с различным недогревом. Результаты измерений изображены на 6 диаграмме, после экстраполяции критического теплового потока для случая недогрева  $\Delta T_2 = 65^{\circ}\text{C}$  его значение равно

$$q_b / 4 / = 5,2 \cdot 10^6 \text{ ккал/м}^2 \text{ час}$$

В литературе /10/ дают многочисленные соотношения, очень близкие к вышеприведенным четырём результатам. Даже для самой малой из всех четырёх величин критического теплового потока, запас равен:

$$j_b = \frac{q_{111}}{q_{10M\&ml}} = \frac{4,62 \cdot 10^6}{1,89 \cdot 10^6} = 2,44$$

Этот запас вполне достаточный.

Расчёт произведен для максимального теплового потока

$$q = 1,89 \cdot 10^6 \text{ ккал/м}^2 \text{ час}$$

В реакторах ВВР-С, действующих уже несколько лет, расположено уже не 36, а больше чем 40 кассет ТВЭЛ-ов, значит, максимальная тепловая нагрузка значительно меньше, а запас больше рассчитанного значения.

#### в) Действие пузырьков на реактивность

В литературе, занимающейся поверхностным кипением не описывается действие паровых пузырьков на реактивность. Причиной этого является то, что процентное количество образующихся на поверхности пузырьков по сравнению с объёмом замедлителя ничтожное. Величина объёма пузырьков приведена на фиг. 7 и 8 /II/. На объём пузырьков самое большое влияние оказывает недогрев. Влияние скорости тоже значительное, но меньше, чем действие недогрева. В случае уменьшения скорости объём пузырька возрастет и это оказывает отрицательное действие на реактивность.

Объём паровых пузырьков вычисляется по следующей формуле: /12/

$$m = \frac{q_p k}{1,07 h^2 (\Delta T_2)} \quad \text{см}^3 / \text{см}^2$$

(здесь число  $R_r$  и  $k$  нужно подставить при температуре насыщения жидкости).

Это расчётное соотношение вблизи температуры насыщения хорошо совпадает с данными измерений, а при большем недогреве даёт величину, большую действительного значения. Рассчитывая по данным фиг. 7 и 8 максимальный объём пара в зоне ВВР-С в случае мощности 10 Мвт ( в месте наибольшей нагрузки) составлял бы 1% от количества охлаждающей жидкости, находящейся в зоне, а среднее паросодержание составляло бы 3%. По реактору ВВР-С у нас не имеются измерения каким образом влияют паровые пузырьки, находящиеся в зоне, на реактивность. По ориентировочным измерениям, проведенным в реакторе  $ZR-I$   $1 \text{ см}^3$  вояд изменяет коэффициент на 0,001 %. На основании этих измерений, а также данных кипящего реактора Бонус, можно ожидать, что при поверхностном кипении 3% парового объёма, в среднем находящегося в зоне изменяет коэффициент на 0,1%. Объём пузырьков статистически довольно стабильный, поэтому не вызывает флуктуацию реактивности системы.

#### г) Загрязнение поверхности

Загрязнения, находящиеся в охлаждающей жидкости /соли, частицы металлической окиси/ осаждаются на поверхности ТВЭЛ-а. С увеличением тепловой нагрузки поверхности ТВЭЛ-а увеличивается и загрязнение. По К.Катцу и В.Е.Гопкинсу /13/ в случае тепловой нагрузки, меньшей  $0,5 \cdot 10^6 \text{ ккал/м}^2 \text{ час}$  на поверхности не осаждаются загрязнения, если тепловая нагрузка больше  $0,5 \cdot 10^6 \text{ ккал/м}^2 \text{ ч}$ , то с увеличением тепловой нагрузки загрязнение растёт пропорционально ей. /фиг.9/. Степень загрязнения поверхности не зависит от способа теплоотдачи, т.е. при конвективном теплообмене и поверхностном кипении будет совершенно одинакова. Механизм загрязнения по В.Е.Паркинсу /14/ объясняется тем, что неорганические частицы (например продукты окислений), находящиеся в охлаждающей среде из-за электростатического действия и Брауновского движения движутся в направлении перпендикулярном к поверхности, соприкасаются с поверхностью и там вследствие электростатического притяжения и химической связи прикрепляются к ней. Скорость образования плёнки выражается следующим образом:

$$\frac{dF}{dt} = \sum_i C_i n_i \bar{v}_i S_i$$

Очень примечательно, что загрязнение, осаждающееся на поверхности в зависимости от тепловой мощности находится в динамическом равновесии и величина равновесия со временем не меняется. В случае установившегося состояния скорость осаждения равна растворимости загрязнения, т.е. скорости механического удаления. В состоянии равновесия величина загрязнения, очевидно, зависит ещё от жидкости и материала оболочки ТВЭЛ-а. Теплотехническое действие загрязнения будет то, что осажденное вещество на стенке ТВЭЛ-а увеличивает толщину оболочки материалом плохой теплопроводности, тепловое сопротивление стенки вырастет и вместе с этим подымется и температура стенки ТВЭЛ-а.

#### д) Вибрация ТВЭЛ-а

Пузырьки, образующиеся на ТВЭЛ-е, приводят его в колебание . Вибрация

ТВЭЛ-а возбуждается конденсацией пузырьков. Вибрация вблизи критического теплового потока очень большая, дальше от него ничтожная. Вибрация появляется совместно со звуковым явлением /15/. Вслучае тепловой мощности 10 Мвт в реакторе ВВР-С тепловой поток ещё далёк от критического и поэтому вибрация - как это во время проведенных исследований при подобных обстоятельствах визуально наблюдали - будет очень малой. Следует отметить, что в кипящем реакторе воздействие вибрации обычно не учитывается.

#### е) Аварийная защита

Как уже видели, запас против перегорания ТВЭЛ-а в нормальном эксплуатационном состоянии должен быть хотя бы  $j = 2$ . Неисправность охлаждающего контура, например, при отсутствии тока в цепи циркуляционного насоса коренным образом изменяет величину этого запаса. При остановке насосов скорость циркуляции быстро уменьшается, вследствие чего жидкость нагревается. Уменьшение скорости и недогрева уменьшает и величину критического теплового потока, значит, запас будет ещё меньше. Хотя у нас нет опытных данных, как уменьшается скорость в реакторе ВВР-С, всё-таки в случае отсутствия тока подобная диаграмма реактора Бонуса /16/ приведена на фиг. 10. /При предварительных измерениях уменьшение скорости в реакторе ВВР-С происходит немного быстрее, чем по фиг. 10/. По диаграмме 10 через 5 сек. после остановки насосов из-за отсутствия тока охлаждающая вода циркулируется со скоростью равной части от первоначальной скорости, при этой скорости критический тепловой поток в случае реактора ВВР-С  $q_b(0,5 \text{ м/сек}) = 2,4 \cdot 10^6 \text{ ккал/м}^2\text{ч}$  /собственное измерение/. Из этого видно, что располагаем достаточным временем для введения в действие защиты при отсутствии тока, так как защита реактора ВВР-С пригодна для того, чтобы через 3 секунды после подачи аварийного сигнала стержни аварийной защиты остановили реактор. С полной уверенностью можем сказать, что аварийная защита реактора ВВР-С пригодна для того, чтобы в зоне при мощности 10 Мвт применяли поверхностное кипение. Должны отметить, что требования к аварийной защите связаны с большой тепловой мощностью, а не поверхностным кипением, поэтому этот вопрос должен рассматриваться при любом увеличении мощности.

#### Обобщение

В рамках вышеперечисленного показали, что с увеличением скорости и температуры ТВЭЛ-а мощность реактора ВВР-С можно увеличить только в некоторой степени, но ни в коем случае не до 10 Мвт./пункты I и 3/. С увеличением скорости до  $1050 \text{ м}^3/\text{час}$ , программированием количества жидкости, протекающей в кассетах ТВЭЛ-а, с допуском поверхностной температуры до  $100 - 105^\circ\text{C}$ , а также опираясь на наши приближенные расчёты, относящиеся к режиму с 42 - 44 кассетами, что отличается от первоначального режима, когда имелось 36 кассетов и в то же время опираясь на данные измерения по /1/ можем сказать, что мощность реактора ВВР-С примерно до 5 Мвт - может быть увеличена без всяких существенных переделок./

Увеличение поверхности ТВЭЛ-ов /пункт 3/ является очень надёжным методом для увеличения мощности, но это приводит к замене не только ТВЭЛ-ов, но и к полной замене активной зоны, и поэтому увеличение мощности по такому методу нужно рассматривать не только с технической точки зрения, но и экономической. Показали, что с применением поверхностного кипения без всякой перестройки можно достигнуть желаемого увеличения мощности. На основе проведенного исследования поверхностного кипения увеличение мощности по пунктам а, б и в может быть, а проведенные исследования в пункте г и д нужно основательнее исследовать на моделях. Кроме этого, следует рассмотреть отмеченные ещё в обобщении исключительно важные технологические и другие проблемы не теплотехнического характера, которые очень важны с точки зрения увеличения мощности. Хотя у нас не имеются собственные данные, в приложении 2 резюмировали коррозионные исследования на различных сортах алюминия, близких к материалу ТВЭЛ-а ЕК-10 в зависимости от температуры. По этим данным поверхностная температура 140°C ещё не означает большую скорость коррозии, которую с помощью ингибиторов можно ещё уменьшить. При оценке результатов коррозионных исследований нужно учесть, что скорость коррозии, возросшую из-за температуры уменьшенное время выгорания ТВЭЛ-а полностью или не полностью компенсирует. Следует ещё отметить, что рано или поздно необходимой замене ТВЭЛ-ов ЕК-10 целесообразно было бы их заменить ТВЭЛ-ами, оболочка которых изготовлена из алюминия. Эта оболочка имеет такую же геометрию, как и оболочка ТВЭЛ-а ЕК-10, но при более высокой температуре обладает достаточной коррозионной стойкостью и наиболее высокой прочностью, если самым подходящим окажется увеличение мощности методом поверхностного кипения.

Приложение I.

Поверхностное кипение

Впервые исследования теплоотдачи кипением провели в 1926 г. Мосцики и Бродер в сосуде, наполненном водой при помощи электрически нагретого провода. Кривую кипения, как функцию разности температуры стенки /  $t_w$  / нагревателя и температуры /  $t_s$  / насыщения жидкости /  $\Delta t_1 = t_w - t_s$  / впервые дающую тепловую нагрузку поверхности, определил Нукияма в 1934 году /фиг.3/. Различим кипение, происходящее в жидкости спокойного состояния, когда жидкость в массе своей неподвижна, только вокруг ТВЭЛ-а образуется свободное движение и кипение принужденной циркуляции, когда жидкость движется всей своей массой. Кроме этого, различим ещё недогретое поверхностное кипение, когда температура жидкости находится ниже температуры насыщения и кипение, происходящее в насыщенной или слабо перегретой жидкости. В энергетических реакторах целесообразнее принять последнее, потому тогда давление системы меньше, а температура охлаждающей жидкости может быть больше, хотя при охлаждении недогретым поверхностным кипением допускается большая тепловая нагрузка.

В случае поверхностного кипения принужденной циркуляции и кипения, происходящей в спокойной жидкости, тепловая нагрузка в зависимости от разности температур перегрева  $\Delta t_1$  будет одинакова, только меняется начало кипения и критическая точка, поэтому большинство исследований поверхностного кипения проделали в спокойной жидкости. С увеличением тепловой нагрузки в спокойной жидкости, стенка ТВЭЛ-а перегревается и когда величина перегрева достигнет определенной величины, на поверхности образуются паровые пузырьки. Пузырьки образуются всегда в каком-нибудь углублении поверхности. В этих углублениях находятся абсорбированный газ и пар. Величина углублений определяет ту минимальную температуру перегрева, которая необходима для образования пузырьков  $\Delta t_1 = k \frac{2\sigma}{r}$ . Пузырьки, образующиеся на поверхности и отрывающиеся оттуда, разрушают граничный слой /перегретую жидкость, находящуюся близко к поверхности, выталкивает в турбулентную зону и на место этой жидкости поступает более холодная жидкость/ и с этим интенсивность теплоотдачи улучшается. Улучшение коэффициента теплоотдачи произойдет на I - 2 порядка .

С увеличением поверхностной тепловой нагрузки увеличивается степень перегрева, после достижения определенной величины теплоотдача начинает ухудшаться /на фиг.3 точка С/, на поверхности густо образующиеся паровые пузырьки сливаются, покрывая поверхность время от времени отрывающейся плёнкой, что снижает теплоотдачу.

С дальнейшим увеличением разности температур нестабильная паровая плёнка превращается в стабильную, теплоотдача происходит через паровую плёнку, когда же с увеличением температуры всё в большей степени прибавляется к ней и тепловое излучение. Если температура поверхности не зависит от мощности - так и у ТВЭЛ-ов реакторов - то, где после достижения критического теплового потока поверхность ТВЭЛ-а за очень короткое время нагревается до температуры,

соответствующей точке Е. Температура, соответствующая точке Е в большинстве случаев находится выше температуры плавления применяемого металла, ТВЭЛ - перегорает, поэтому критический тепловой поток можем назвать тепловым потоком перегорания.

В случае поверхностного кипения при принудительной циркуляции при наличии низких тепловых нагрузок теплоотдача происходит конвекцией и из конвективной теплоотдачи получится поверхностное кипение, когда кривая конвективной теплоотдачи /при тепловом потоке  $q_0$ / пересечёт кривую кипения /фиг.3 точка  $P_0$ /.

В действительности, уже при более низкой тепловой нагрузке начинается образование пузырьков, но на полную поверхность распространяется только при тепловой нагрузке  $q_1 = 1,4 q_0$  /точка  $P_1$  на переходной кривой/. С увеличением скорости для начала образования пузырьков требуется больший тепловой поток, итак, даже перегорание происходит при всё большем тепловом потоке.

Недогрев действует на образование пузырьков, подобным образом, как скорость. Чем больше недогрев, тем больший тепловой поток требуется для образования пузырьков и тем больше будет и критический тепловой поток. Особенно стоит обратить внимание на действие недогрева на критический тепловой поток. Недогрев сильно увеличивает критический тепловой поток, поэтому там, где критический поток должен быть большим, желателен больший недогрев. В реакторе ВВР-С недогрев благоприятен -  $50-70^{\circ}\text{C}$ , - и поэтому критический тепловой поток может иметь очень большую величину.

На поверхностное кипение действуют ещё многие факторы, так например температура, поверхность, содержание газа, размеры каналов и т.д. Из этих факторов в реакторе ВВР-С из-за низкой температуры охлаждающей жидкости и открытой водяной поверхности только содержание газа окажет действие. К давлению жидкости, содержащей газ, прибавляется ещё парциальное давление растворенного газа, поэтому для начала кипения потребуется меньшая разность температуры. При увеличении теплового потока и вместе с этим температуры перегрева, парциальное давление газа играет всё меньшую роль. Значит, действие растворенного газа в жидкости не недостаток, более того, имеет преимущество, но преимущество временное, так как в непрерывной эксплуатации жидкость дегазируется, поэтому действие ничтожно.

Подобным образом, действие размеров ТВЭЛ-а и канала имеют ничтожное влияние на кипение. На фиг.2 изображена кривая кипения дистиллированной воды, при температуре насыщения  $T_s = 109^{\circ}\text{C}$ .

Приложение 2.

Коррозия алюминия

Исследование коррозии защитной оболочки ТВЭЛ-а ЕК-10 не было проведено нами, но мы считаем необходимым привести несколько данных, имеющих в литературе относительно коррозии алюминия подобного состава. По /17/ и /18/ коррозия алюминия (99% чистоты) в дистиллированной воде до 200°C удовлетворительная и до 150 - 170°C можно применять его в реакторе. Кривая коррозии алюминия (99% чистоты) 2S изображена на фиг. II.

Загрязнение такого алюминия больше всего Fe и Si, поэтому по /18/ различные данные коррозии алюминия сплавов Fe и Si при температуре 130, 150 и 200°C, даются в таблице I.

По фиг. 9 скорость коррозии начинает возрастать, если температура будет выше 140°C.

В /19/ показано действие теплового потока на коррозию. Состав исследуемого алюминия был следующий:

элемент	Cr	Cu	Fe	Mg	Ni	Si	Sn	Al
вес %	0,05	0,11	0,5	0,01	0,02	0,1	0,02	99

Исследование было проведено при тепловом потоке приблизительно равным  $4 \cdot 10^6$  ккал/м<sup>2</sup> час. Действие большого теплового потока в основном выявлялось в том, что температура алюминиевого ТВЭЛ-а была выше.

Под действием коррозии на поверхности алюминия образуется слой коррозии, обладающий плохой теплопроводностью, - что при большом тепловом потоке - сопровождается термическим сопротивлением, а это увеличивает температуру алюминиевой оболочки.

Алюминий в деионизированной воде при низкой температуре медленно и равномерно ржавеет. При увеличении температуры скорость коррозии растёт. При определенной температуре механизм коррозии изменится, относительно медленная и равномерная коррозия ускорится и возникает интерметаллическая коррозия. Возникновение такой коррозии у алюминия (99% чистоты) начинается свыше 250°C, величина /рН 6-7/, при понижении или повышении величины рН понижается.

Желательно отметить, - хотя это не относится к материалу ТВЭЛ-а ЕК-10, - что скорость коррозии при относительно низком легировании Ni-ем и Ti-ом удовлетворительна и при 350°C. /20/.



Обозначения

- $\alpha$  коэффициент температуропроводности  $\text{м}^2/\text{час}$   
 $A$  поверхность  $\text{м}^2$   
 $d_f$  эквивалентный диаметр  $\text{м}$   
 $F$  поверхность  $\text{м}^2$   
 $J_b$  коэффициент запаса от перегорания  
 $k$  коэффициент теплопроводности  $\text{ккал}/\text{м}^2\text{час}$   
 $h$  коэффициент теплопередачи  $\text{ккал}/\text{м}^2\text{час}$   
 $Q$  тепловая мощность  $\text{ккал}/\text{час}$   
 $q$  поверхностная тепловая нагрузка  $\text{ккал}/\text{м}^2\text{час}$   
 $N$  мощность  $\text{квт}$   
 $q_b$  критический тепловой поток  $\text{ккал}/\text{м}^2\text{час}$   
 $t_k$  средняя температура жидкости  $^{\circ}\text{C}$   
 $t_f$  температура жидкости  $^{\circ}\text{C}$   
 $t_w$  температура стенки  $^{\circ}\text{C}$   
 $t_f$  температура внутри ТВЭЛ-а  
 $\Delta t_f$  разность температуры между стенкой ТВЭЛ-а и жидкостью  $/t_w - t_f / ^{\circ}\text{C}$   
 $\Delta t_b$  перепад температуры в стенке ТВЭЛ-а  $^{\circ}\text{C}$   
 $\Delta t_f$  перепад температуры в топливе /или горючем/  
 $T_s$  температура насыщения  $^{\circ}\text{C}$   
 $\Delta T_2$  недогрев  $/T_s - t_f / ^{\circ}\text{C}$   
 $v$  скорость  $\text{м}/\text{сек}$   
 $x$   $/ v ft / \text{сек} /^{0,5} / T_2 ^{\circ}\text{F} /$   
 $\gamma = q/A \text{ Вт} \cdot \text{м} / \text{с} \cdot \text{кв} \cdot \text{ин} \cdot \text{сек}$   
 $\nu$  кинетическая вязкость  $\text{м}^2/\text{сек}$   
 $\mu$  динамическая вязкость  $\frac{\text{кг} \cdot \text{сек}}{\text{м}^2}$   
 $\eta_r$  коэффициент радиальной неравномерности  
 $\eta_t$  коэффициент продольной неравномерности  
 $\frac{dF}{dt}$  скорость образования поверхностной плёнки  
 $c$  постоянная; теплоёмкость  $\text{ккал}/\text{кг}^{\circ}\text{C}$   
 $n$  концентрация суспендированных твёрдых частиц  
 $\bar{U}$  средняя скорость частиц  
 $S$  вероятность липкости  
 $m$  паровой объём, относящийся к единице поверхности  $\text{см}^3/\text{см}^2$   
 $Pr = \frac{\mu c}{k}$  число Прандтля

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] Стоян Д., Михэйлз А.: Institutul de Fizico Atomica Bucarest, különlenyomat /1961/
- [2] Szentgyörgyi, I.,: KFKI Közlemények, 11, 21 /1963/
- [3] Forster, K.E., Greif, R., Journal of Heat Transfer, vol. 81, series C, No. 1.43. /1959/
- [4] Martini, W.R.,: NAA - SR - 5688
- [5] ANL - 6120
- [6] PRWRA - GNEC - 5 /Book I/
- [7] Emmerson, F.C., Nuclear Eng. 5.493 /1960/
- [8] Gunther, F.C.,: Trans ASME, 1951 febr.
- [9] Kinic Toricai: JAERI 1017, No. 17
- [10] Woodson, C.W., and Batch, J.M.,: HW - 71684
- [11] Jordan, D.P., Leppert, G.,: Int. I. Heat Mass Transfer. 5.751 /1962/
- [12] Griffith, P., Clark, J., Rohsenow, W.,: ASME 58 - HT - 19 /1958/
- [13] Katz, K., Hopkins, W.E.,; Nuclear Science and Eng. 4.673 /1959/
- [14] Parkins, W.E.,; Nuclear Sci. and Eng. 12.91 /1962/
- [15] NDA 2131 - 12
- [16] PWRA - GNEC - 5 /Book II/
- [17] Reaktor Handbook Eng.; McGRAW-Hill, 1955, Chap. 1, 11
- [18] Ketil Viden II. Genfi Konferencia. P/767, Session E-14
- [19] Griess, J.C., Savage, H.C., Mauney, T.H., English, J.L.; ORNL-2939
- [20] Ayres, J.A., HW - 61757 Rev.

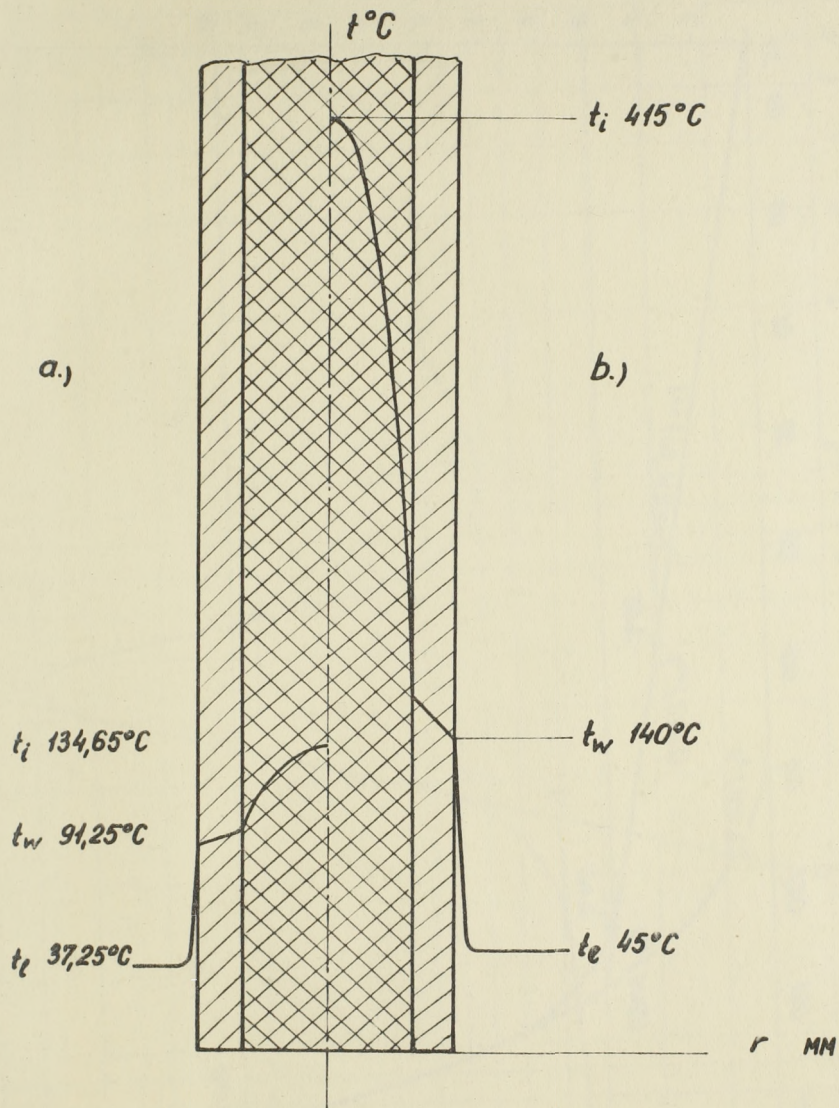


Рис. I Распределение температуры ТВЭЛ-а типа ЕК-10  
 а/ конвективная теплоотдача (мощность 2 Мвт)  
 б/ поверхностное кипение (мощность 10 Мвт)

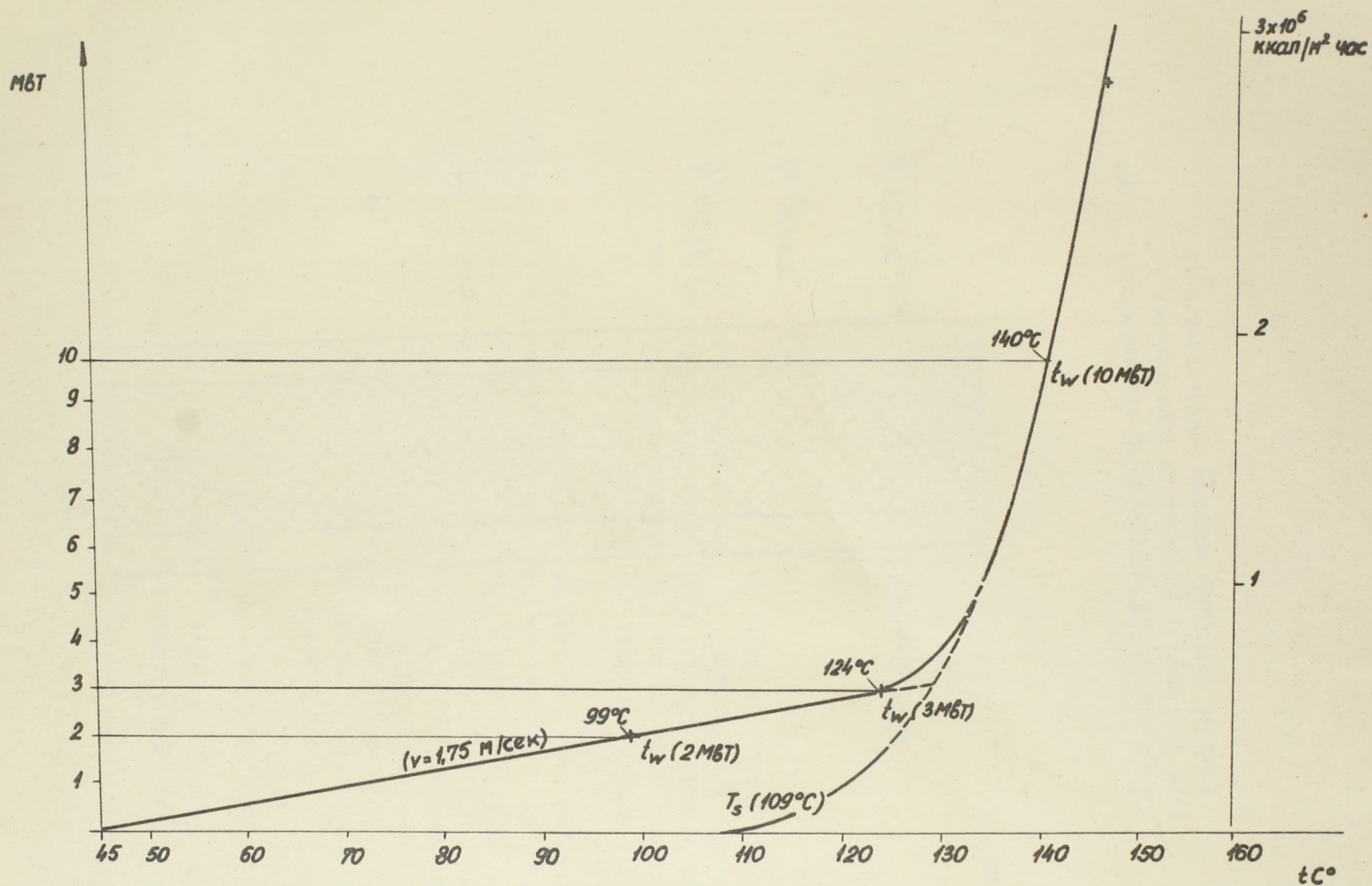


Рис.2 Изменение температуры ТВЭЛ-а типа ЕК-10 в зависимости от тепловой нагрузки.

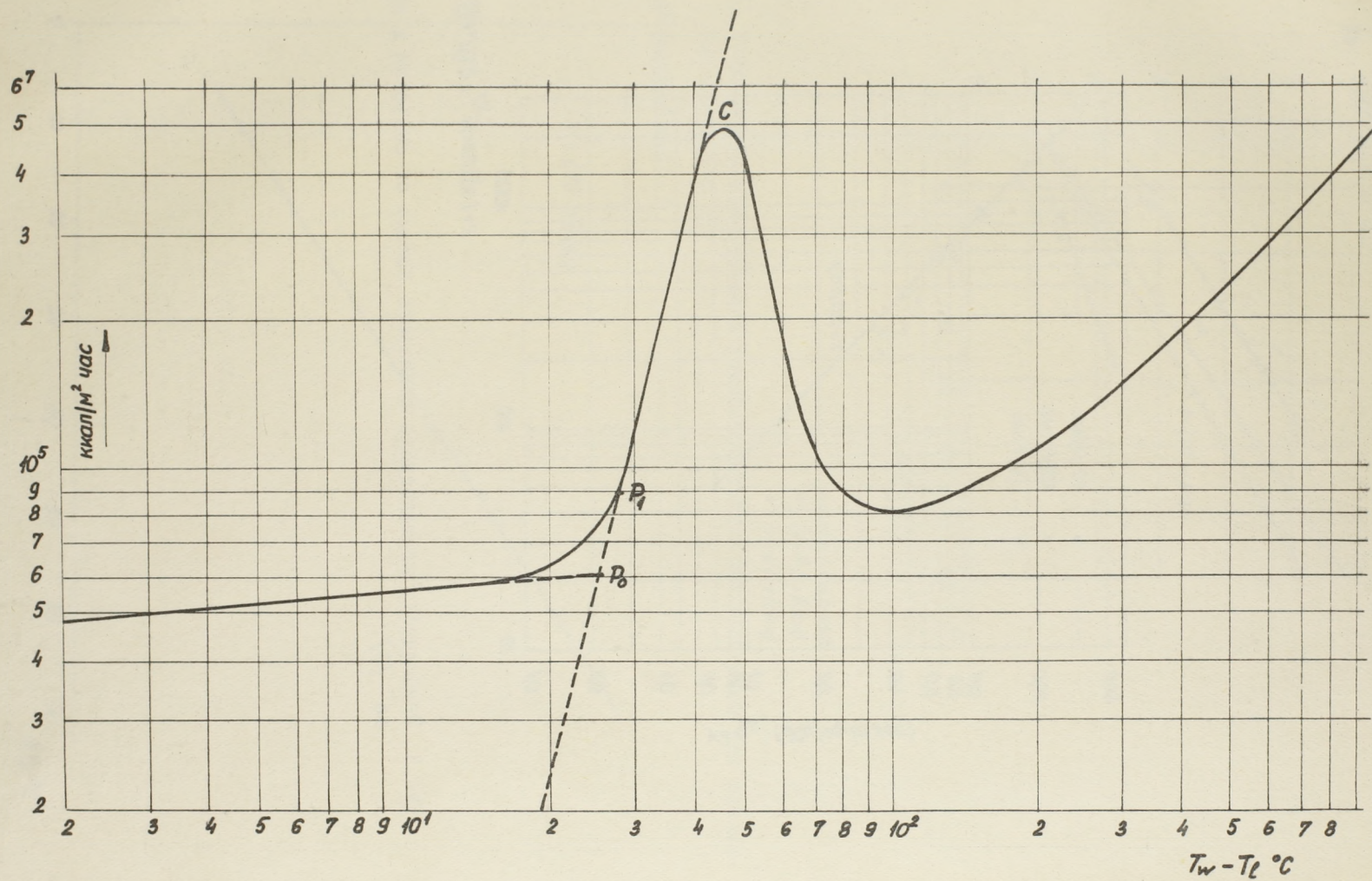


Рис.3 Кривая кипения дистиллированной воды.

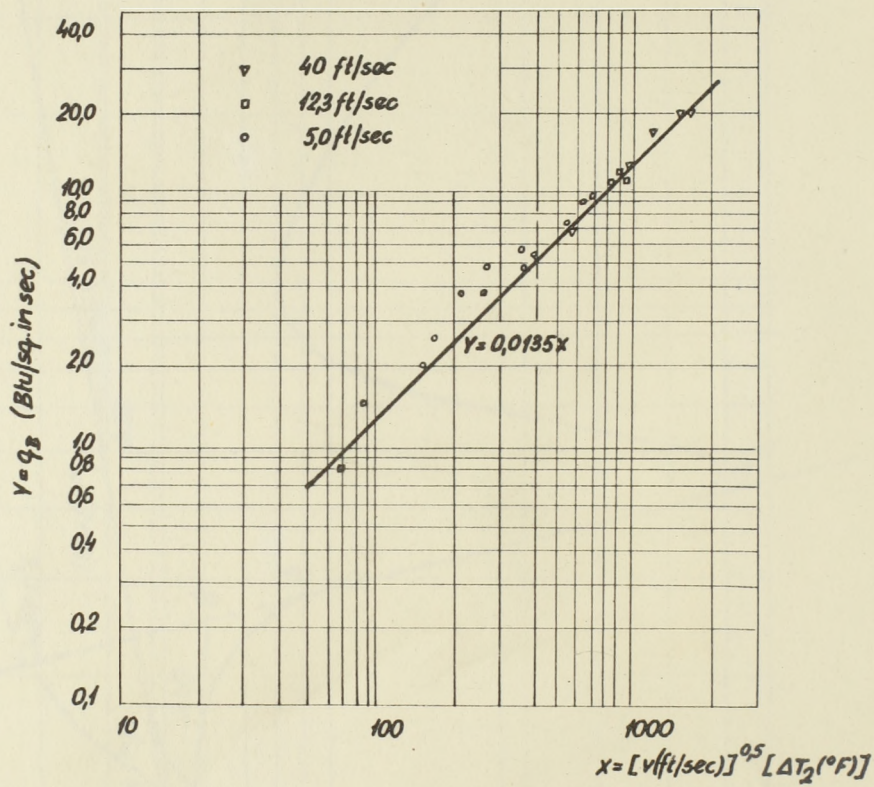


Рис.4 Зависимость критического теплового потока от скорости и недогрева [7].

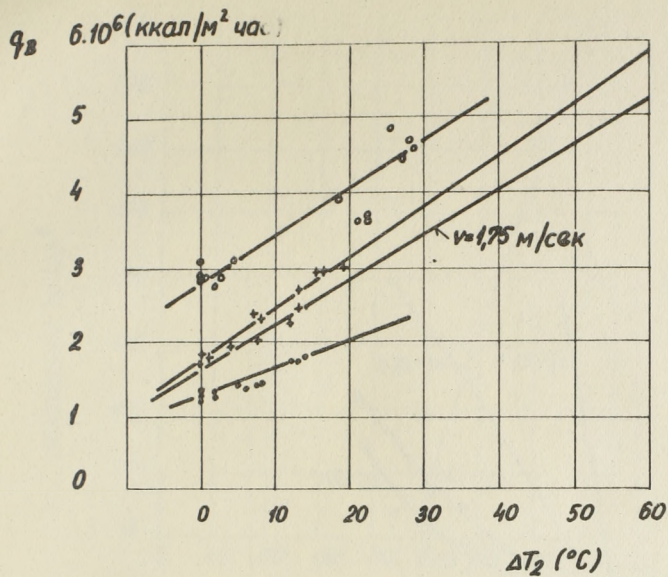


Рис. 5 Зависимость критического теплового потока от недогрева при различных скоростях [9]

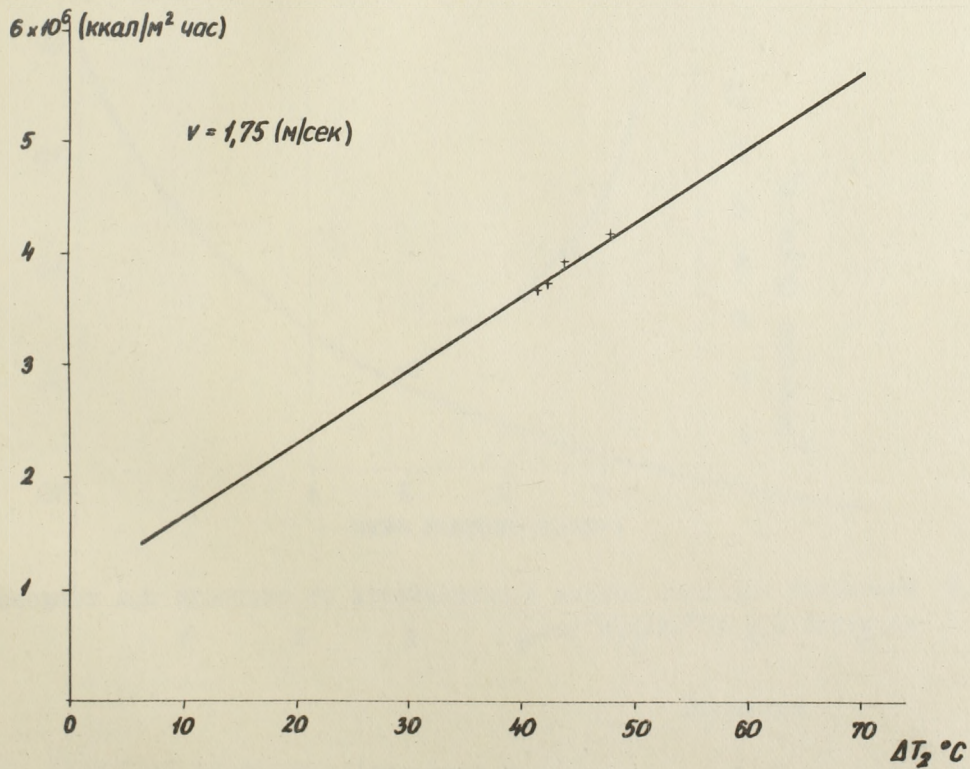


Рис. 6 Зависимость критического теплового потока от недогрева при скорости жидкости 1,75 м/сек.

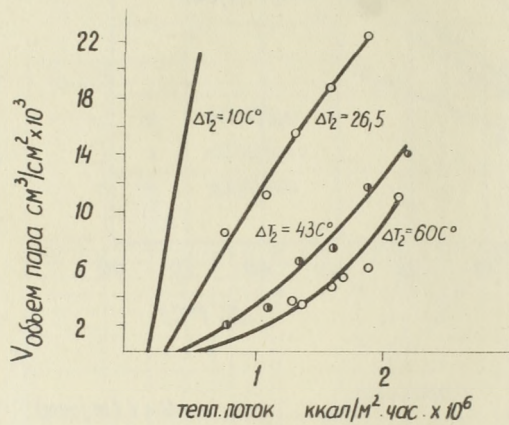


Рис.7 Изменение парового объёма в зависимости от тепловой нагрузки при различном недогреве [11].

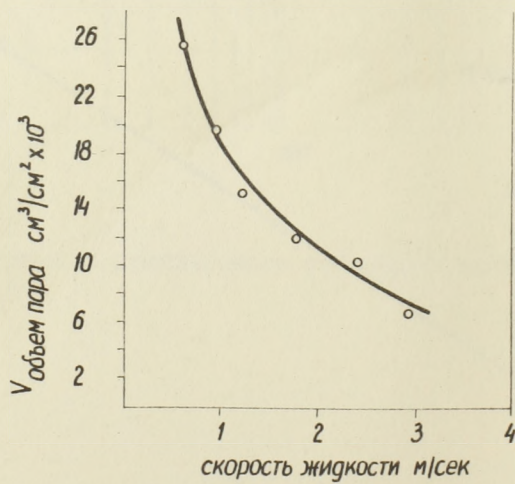


Рис.8 Изменение парового объёма в зависимости от скорости при тепловой нагрузке  $1,6 \cdot 10^6$  ккал/м<sup>2</sup> час.



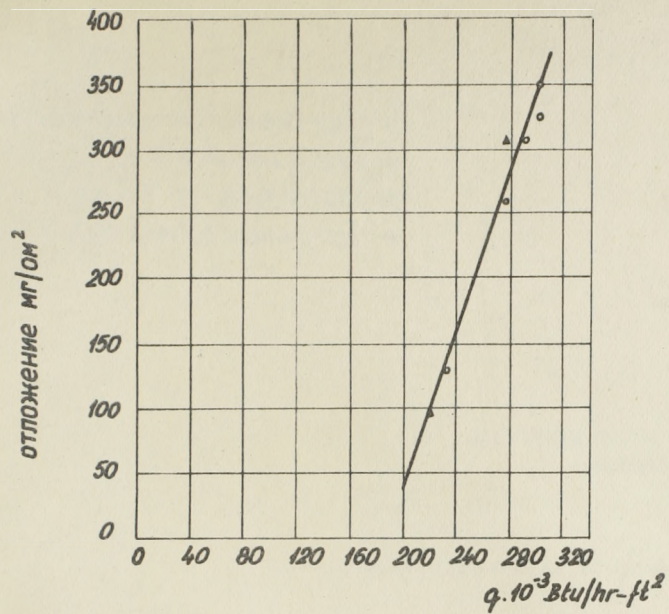


Рис.9 Величина отложения на поверхности ТВЭЛ-а в зависимости от тепловой нагрузки [14].

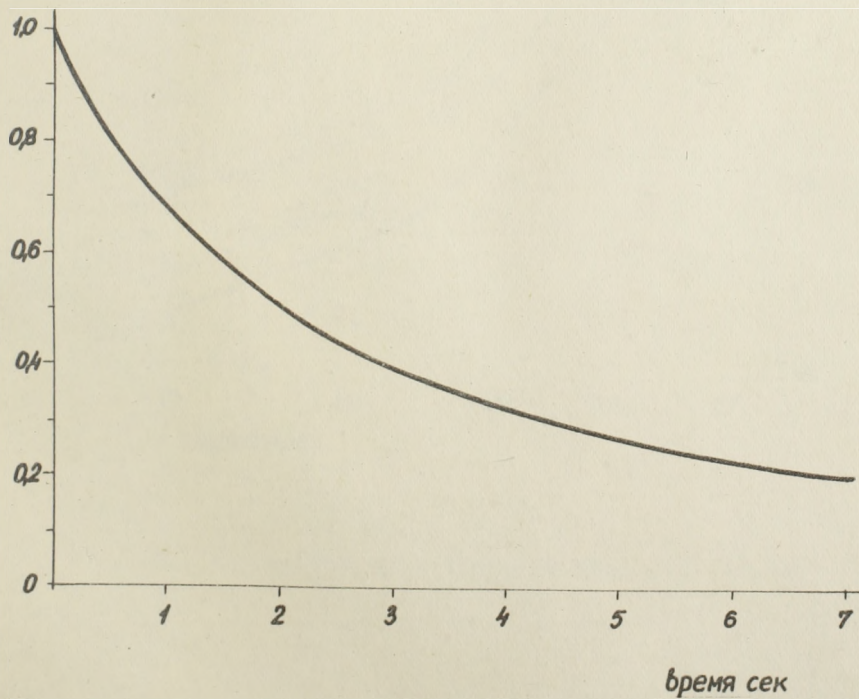


Рис.10 Изменение скорости охлаждающей воды реактора [13] во времени при отсутствии тока в цепи циркуляционных насосов.

- обезгаженная дистиллированная вода
- ⊖ раствор кон-рн 8-9
- ⊕ раствор  $H_2SO_4$  - рн 4,0-4,4
- нормальный раствор  $H_2O_2$

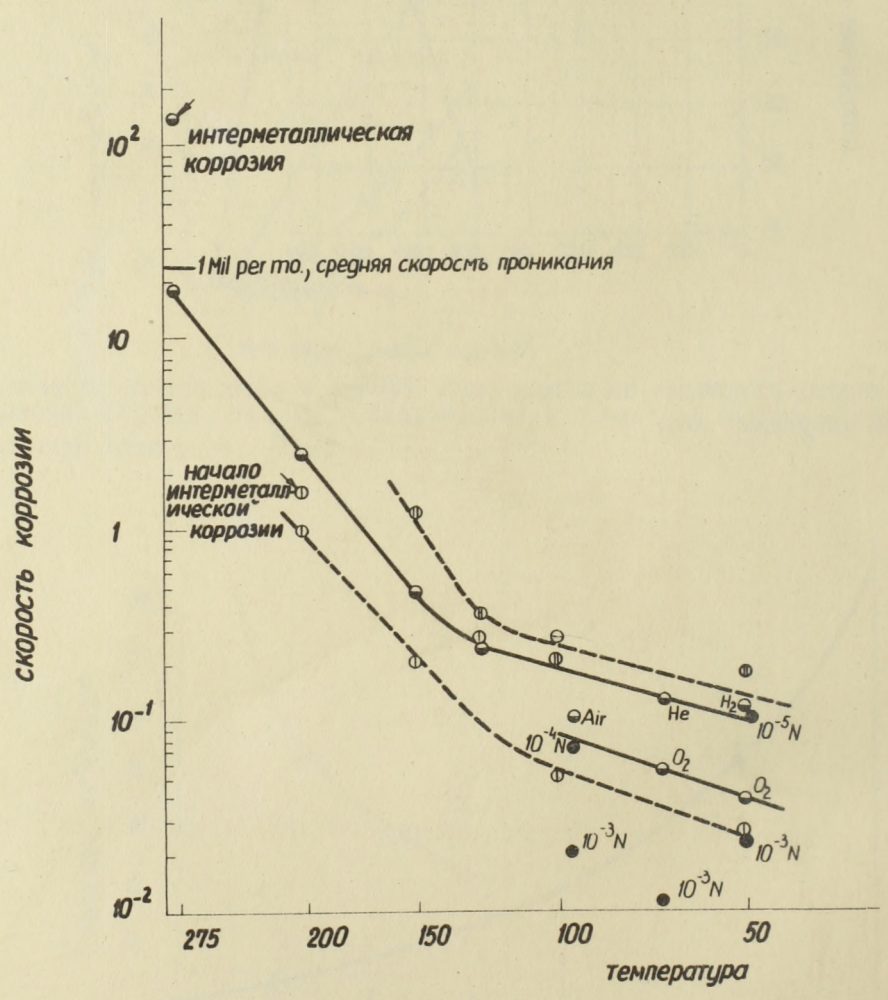


Рис. II Коррозия алюминия 2S в воде [17].

