

## РАСЧЕТ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В АППАРАТЕ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ДРОБИ ТИТАНА ГИДРИРОВАННОЙ

*В. В. Попов*

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров  
[arkad@triton.vniief.ru](mailto:arkad@triton.vniief.ru)

*В статье приведены материалы расчетов физико-химических процессов в проектируемой установке для производства дроби титана гидрированной для биологической защиты реакторов.*

### Введение

В настоящее время существует потребность в создании эффективной биологической защиты ядерных реакторов [1]. Классическим подходом к созданию биологической защиты является создание и использование специальных видов бетонов, содержащих вещества, эффективно замедляющие быстрые нейтроны, поглощающие медленные (тепловые) нейтроны и  $\gamma$ -излучение [2]. Водород является одним из важных элементов, который должен присутствовать в таких бетонах в больших количествах. Для увеличения количества водорода в бетоне для биологической защиты в качестве заполнителя может использоваться гидрированная титановая дробь.

Важным является разработка и реализация эффективной технологии гидрирования титановой дроби, к качеству которой предъявляются достаточно жесткие требования. Во ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» ведутся работы по созданию установки для гидрирования дроби титана. Основным агрегатом установки является газостат, в котором происходят технологические процессы. При создании установки использовалось математическое моделирование физико-химических процессов внутри газостата и последующая оптимизация его конструкции для обеспечения выполнения технологических условий получения гидрированной титановой дроби.

Процесс гидрирование титановой дроби состоит из трех этапов – нагрева и активации, насыщения, остывания. Далее следует выгрузка продукта, загрузка сырья и техническое обслуживание установки. При моделировании этапа нагрева и активации важно было показать, как будет происходить разогрев газостата, выравнивание и установление температурных полей в нем. Моделирование второго этапа работы являлось самым важным ввиду потребности достаточно точного воспроизведения протекания реакции гидрирования. Поэтому для моделирования данного этапа пришлось первоначально моделировать отдельные эксперименты по насыщению дроби титановой с целью определения параметров уравнения описывающего протекание реакции. На данном этапе выполнялась оптимизация конструкции газостата путем измене-

ния конструкции внутренних элементов газостата. Основным критерием при оптимизации было максимальное выравнивание поля температур внутри газостата, что позволило обеспечить равномерное гидрирование в течение всего времени. На последнем этапе основной задачей было показать возможность уменьшения времени остывания газостата за счет продувки газостата гелием с последующим охлаждением гелия на теплообменнике. Для этого потребовалось оценить различные режимы работы выбранной конструкции теплообменника с тем, чтобы эти данные использовать при моделировании. Также для этапов насыщения и остывания расчетным путем было показано, что градиент температуры, возникающий в стенке корпуса газостата ввиду охлаждения его наружной части, не приводит к переходу корпуса в зону пластических деформаций.

Для всех этапов технологического цикла выполнялось моделирование процессов теплопереноса методом конечных элементов, а для этапа гидрирования дополнительно производилось решение обыкновенного дифференциального уравнения, описывающего протекание реакции гидрирования. Задача решалась как двумерная осесимметричная ввиду конструкции газостата. Поскольку было выполнено моделирование различных вариантов конструкции газостата, то далее, для сравнения, приведены только данные по первоначальной (исходной) и окончательной конструкциям газостата.

### **Конструкция газостата и описание моделирования**

Газостат является основным агрегатом установки и предназначен для выполнения всех технологических операций при получении дроби гидрированной титановой. Исходная и окончательная (выбранная по результатам расчетов) конструкция газостата представлена на рис. 1. Нагрев газостата может осуществляться от внешнего нагревателя, установленного на корпусе (исходная конструкция), или внешнего инфракрасного нагревателя, расположенного с зазором напротив ребер охлаждения (окончательная конструкция). Также для поддержания необходимой температуры на стадии получения гидрида используется тепло выделяемое в процессе протекания реакции гидрирования. Основное охлаждение осуществляется посредством ребер на корпусе газостата (печь после нагрева убирается) и посредством прокачки газа (водород, гелий или их смесь) через полость газостата. Охлаждение мест уплотнения выполняется посредством водяного охлаждения.

Конструкции газостатов различаются: количеством чашечек для расположения продукта; емкостью, формой и материалом чашечек; формой и размерами нижней части газостата и корпуса; наличием дополнительных элементов. Конструктивные изменения были внесены для выравнивания температур внутри массива чашечек, уменьшения теплопотерь в нижней части газостата и как следствие уменьшения теплового потока, приходящего на уплотнения корпуса, а также для увеличения эффективности охлаждения на стадии насыщения и охлаждения.

Теплофизические характеристики материалов газостата стандартные и брались из справочника [3]. Процессы излучения важные на стадии нагрева

и активации учитывались посредством нелинейной зависимости коэффициента теплопроводности внутренней среды (вакуум или водород) от температуры. Данная зависимость приведена в табл. 1 и была получена из рассмотрения тепловых потоков в зазоре между корпусом и массивом чашечек при нагреве при различных температурах. Излучение вносит наибольший вклад в теплоперенос, особенно при больших разностях температур. Вклад теплопроводности мал и проявляется в области низких температур, где градиенты малы и соответственно мал тепловой поток. Вклад конвективного теплопереноса также мал по сравнению с переносом тепла излучением, поскольку на стадии нагрева происходит вакуумирование, а на стадии насыщения градиенты температур намного меньше и вдобавок водород согласно конструкции аппарата подается по центральной трубке, течет от центра к корпусу и по пути поглощается титаном и нагревается. Поэтому для случаев вакуума и наличия водорода теплопроводность среды задавалась одинаковой зависимостью от температуры, в которой основную роль играет перенос излучением. Плотность и теплоемкость среды полости газостата соответствуют воздуху при давлении  $10^{-2}$  мбар в случае вакуума, водороду и гелию при давлении 1 бар на этапе гидрирования и остывания (реально давление изменяется, но такое грубое допущение не сильно влияет).

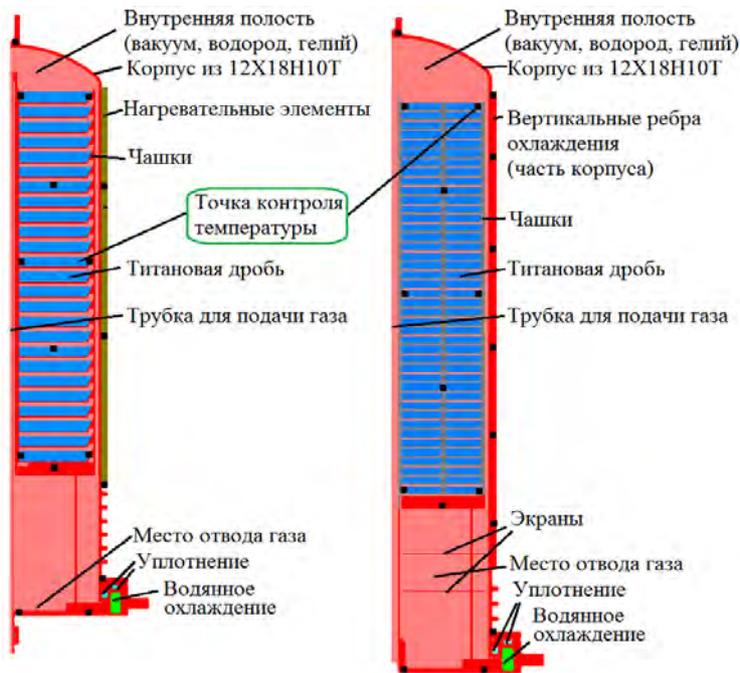


Рис. 1. Исходная (слева) и окончательная (справа) конструкции газостата (точками указаны места, для которых далее построены графики величин)

Таблица 1

## Теплофизические характеристики материалов

№	Наименование	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Теплоемкость, Дж/кг·К	Теплопроводность	
				Температура, °С	Значение, Вт/м·К
1	Среда полости газостата (вакуум)	$7 \cdot 10^{-7}$	1000	0	0,023
				200	0,088
				400	0,263
				500	0,373
				700	0,72
				800	0,98
				1000	1,68
2	Среда полости газостата (водород и в скобках гелий)	0,089	14200 (5200)	0	0,023
				200	0,088
				400	0,263
				500	0,373
				700	0,72
				800	0,98
				1000	1,68

Во всех расчетах водяное охлаждение задавалось как поглощение тепла на области занятой водой (значения приведены в табл. 2). Значение получено с учетом объема области с водой и из допущения, что при температуре на входе равной 20 °С и температуре на выходе близкой к 100 °С (без парообразования) и расходе 50 см<sup>3</sup>/сек. из системы будет уноситься тепло подводимое к газостату при нагреве. Процесс парообразования при превышении значения 100 °С не учитывался, в расчетах производился лишь контроль не превышения температуры 100 °С.

Таблица 2

## Удельное теплотеплопоглощение в области с водой

Удельное теплотеплопоглощение	
Температура, °С	Значение, Вт/см <sup>3</sup>
0	0
20	0
100	-38,45

**Этап нагрева и активации**

На данном этапе необходимо нагреть газостат и исходную дробь титановую помещенную внутрь газостата с 20 °С до рабочей температуры и выдержать при этой температуре 1–3 часа. Во время всего этого процесса происходит вакуумирование полости газостата и охлаждение места уплотнения внизу корпуса. Суммарная тепловая мощность нагревательных элементов по ре-

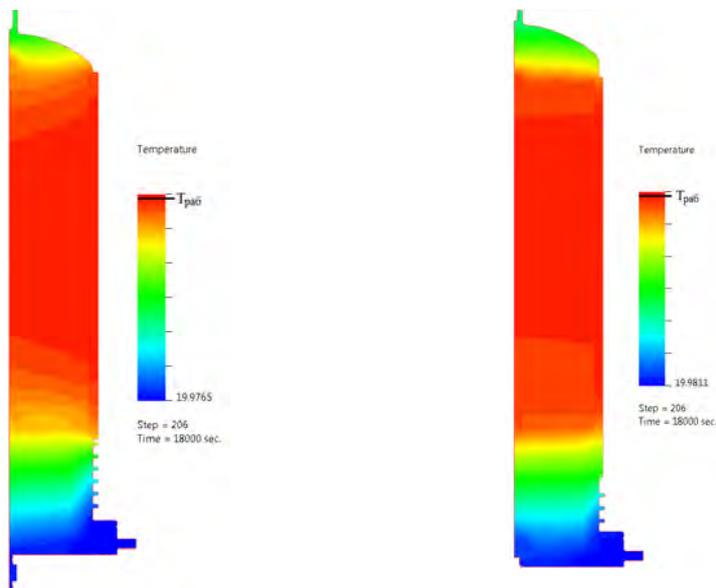
зультатам предварительных расчетов была выбрана 18–20 кВт для обеспечения относительно быстрого нагрева газостата. При моделировании работа нагревательных элементов задавалась в виде температурной зависимости удельного теплового потока, падающего на внешнюю стенку корпуса напротив массива чашек в случае конструкции с инфракрасным нагревателем, и в виде температурной зависимости удельного тепловыделения в случае конструкции с нагревательными элементами. В табл. 3 приведена температурная зависимость удельного теплового потока от нагревательных элементов и аналогичная зависимость удельного тепловыделения. Заданное уменьшение тепловой мощности нагревателя отражает управление нагревателем по показаниям установленных термодпар.

Таблица 3

Зависимость удельного теплового потока от нагревательных элементов

Температура, °С	Удельный тепловой поток, Вт/см <sup>2</sup>	Удельное тепловыделение, Вт/см <sup>3</sup>
0	4	4,58
$0,65 \cdot T_{\text{рабочая}}$	3	3,44
$0,8 \cdot T_{\text{рабочая}}$	2	2,29
$T_{\text{рабочая}}$	0	0

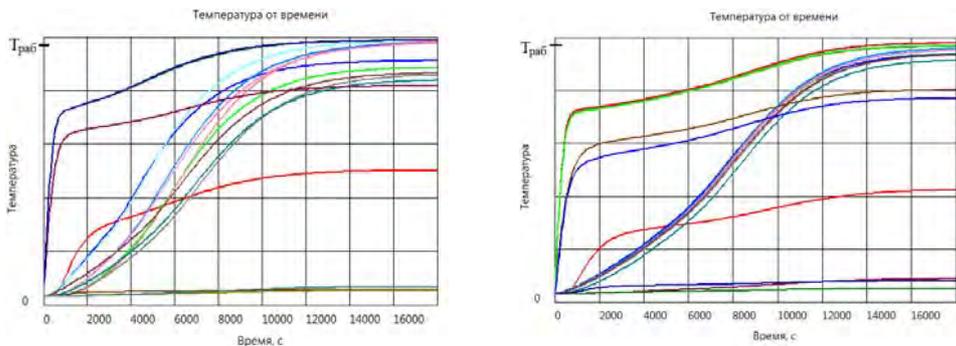
Полученные поля распределений температур на момент времени 18000 с (5 часов) для исходной и окончательной конструкций приведены на рис. 2. Графики изменения температур для обеих конструкций в точках указанных на рис. 1 приведены на рис. 3.



а) исходная конструкция

б) окончательная конструкция

Рис. 2. Распределение температур на момент времени 18000 секунд (5 часов) после начала нагрева



а) исходная конструкция

б) окончательная конструкция

Рис. 3. Графики изменения температур в точках указанных на рис. 1

### Этап насыщения

На данном этапе необходимо выдерживать во всем массиве чашек оптимальные условия для проведения реакции гидрирования, которые были определены ранее в исследованиях. Поскольку реакция гидрирования экзотермическая, то скорость протекания реакции зависит от отвода тепла из установки и от подачи водорода (температура и давление водорода над гидридом определяют поглощение согласно фазовой диаграмме на рис. 5 [4]). Основное охлаждение установки на данном этапе будет происходить за счет передачи тепла конвекцией и излучением от чашек на корпус и далее с корпуса в окружающую среду. Дополнительное охлаждение может быть организовано за счет замены водородной среды при низком давлении внутри установки на среду, представляющую собой смесь водорода и гелия, и принудительной прокачки этой среды через теплообменник. При этом доля водорода в этой среде должна меняться в течение процесса. Несколько более эффективное основное охлаждение может быть достигнуто за счет принудительного обдува корпуса во время процесса. Но при этом следует учитывать, что сильное охлаждение корпуса может привести к большим температурным градиентам внутри стенки корпуса и как следствие к излишним механическим напряжениям, что может привести к недопустимым деформациям корпуса. При оптимизации конструкции газостата целью было добиться максимального выравнивания значений температурного поля внутри массива чашек и попадания минимальных и максимальных значений температур в течение всего времени насыщения в найденные на этапе НИР значения, а также снижения времени насыщения.

Кинетическое уравнение процесса гидрирования при моделировании было использовано следующее

$$\frac{dF(T, P)}{dt} = (1 - F(T, P)) f_{sorb}(T, P),$$

$$f_{sorb}(T, P) = C_a \exp\{-E_a/RT\} \ln\{P_j/P_{eq}\},$$

$$\ln\{P_{eq}\} = -E_1/RT + E_2/R.$$

Сюда входят следующие величины:  $F(...)$  – степень насыщения (количество гидрида, 0...1);  $f_{sorb}(...)$  – функция, описывающая процесс гидридообразования;  $C_a$  – предэкспонента соответствующего процесса;  $E_a$  – энергия активации сорбции;  $P$  – давление водорода;  $E_1$ ,  $E_2$  – энтальпия и энтропия процесса гидридообразования;  $P_{eq}$  – равновесное давление водорода над гидридом. В общем случае любая из этих величин может быть функцией от ряда других величин. Последнее выражение - уравнение Ван-Гоффа, определяющее равновесные давления  $P_{eq}$ . При этом процессы десорбции не учитывались поскольку данные режимы в технологическом процессе и в обрабатываемых экспериментах не реализовывались.

Величины, задающие протекание реакции гидрирования, определялись по справочникам и уточнялись по результатам экспериментов и приведены в табл. 4. Сутью экспериментов было равномерное медленное гидрирование малых количеств титановой дроби при постоянной температуре и постоянном равномерном напуске водорода. В экспериментах фиксировалось давление и ряд других параметров. Типичный график давления показан на рис. 4. На рис. 5 и 6 показана исходная фазовая диаграмма [4] и ее аппроксимация, использованная в расчетах. Отметим, что более правильным подходом являлось бы использование в расчетах фазовой диаграммы полученной в экспериментах на предполагаемом сырье.



Рис. 4. График изменения давления в эксперименте

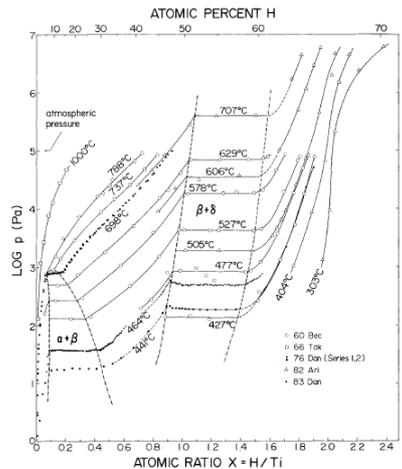


Рис. 5. Фазовая диаграмма системы водород-титан [4]

Расчет этапа гидрирования производился аналогично этапу нагрева. Отличия состояли в том, что материал полости газостата выбирался с параметрами водорода – плотность  $0,089 \text{ кг/м}^3$  (при давлении 1 атм. и температуре 293К), теплоемкость  $14200 \text{ Дж/кг}\cdot\text{К}$ . При задании параметров не учитывалось изменение плотности от температуры и давления, что по оценкам внесло не-

значительную погрешность. В качестве начальных данных использовалось распределение температур на момент времени 18000 секунд из предыдущего этапа расчетов. Начальная степень насыщения гидрида и давление водорода принимались равными нулю. Изменение давления задавалось алгоритмом, который добавлял или убавлял давление с некоторым шагом пропорционально отклонению температуры от рабочей температуры в точке контроля температуры (рис. 1). При этом давление ограничивалось минимальным равным 0 и максимально заданным значением. На боковой поверхности газостата задавались условия свободной конвекции.

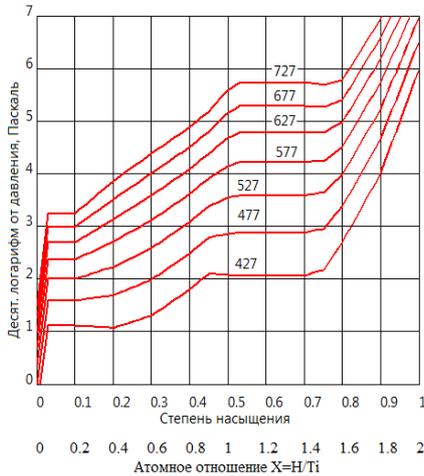


Рис. 6. Аппроксимированная фазовая диаграмма

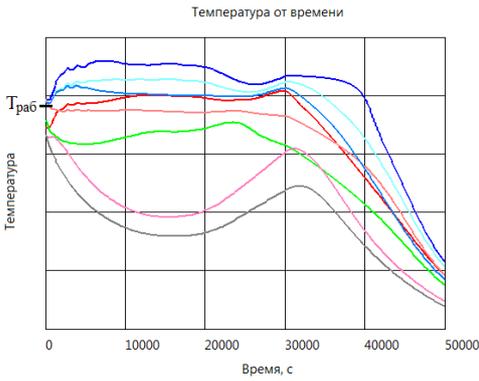
Таблица 4

Значения параметров для титана и его гидрида, использованные при расчете

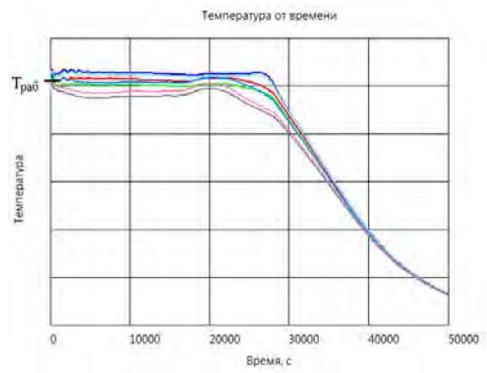
№	Параметр	Степень насыщения	Значение
1	Энтальпия, кДж/моль	0–1	85,36 – 164,02
2	Энтропия, Дж/моль	0–1	18,04 – 177,98
3	Теплопроводность, Вт/м·К	–	1
4	Теплоемкость, Дж/кг·К	–	540
5	Плотность, кг/м <sup>3</sup> (60 % от кристаллической)	–	2700
6	Тепловой эффект реакции гидрирования, кДж/моль (на моль поглощенного водорода)	–	165
7	Предэкспоненциальный множитель сорбции	0–1	0,3–6
8	Энергия активации сорбции, Дж/моль	–	71836

Полученные графики температур, степени насыщения в точках указанных на рис. 1 (только точки внутри массива чашек) для исходной и окончательной конструкций приведены на рис. 7, 8. Графики изменения давлений

в моделируемом технологическом процессе на рис. 9. Распределения полей температур на моменты времени 15000, 28000, 40000 секунд и степени насыщения для моментов времени 15000, 28000, 40000, 50000 секунд приведены на рис. 10–13. Степень насыщения равная единице соответствует максимально возможному весовому проценту водорода в гидриде.

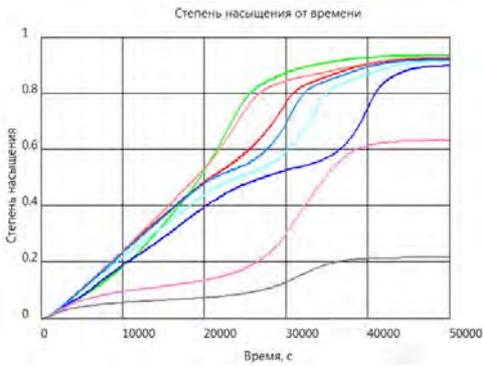


а) исходная конструкция

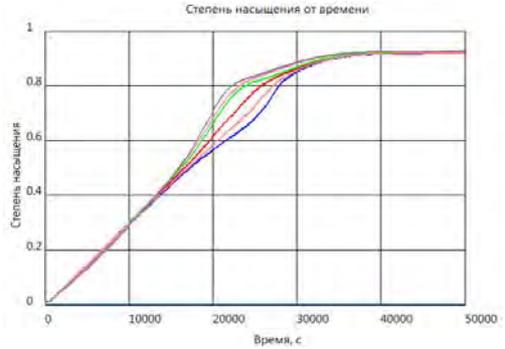


б) окончательная конструкция

Рис. 7. Графики изменения температуры в точках указанных на рис. 1



а) исходная конструкция

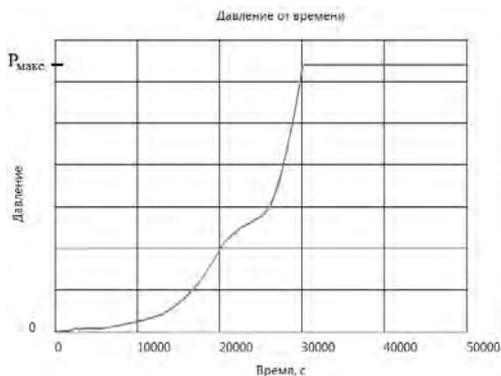


б) окончательная конструкция

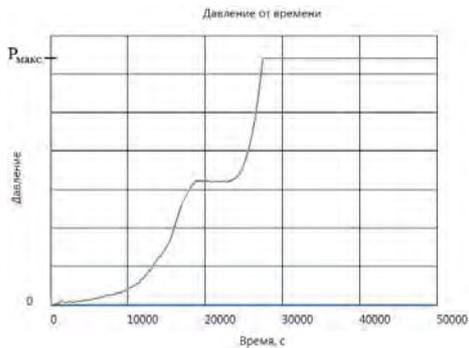
Рис. 8. Графики степеней насыщения в точках указанных на рис. 1

Из приведенных графиков, распределений температур и степеней насыщения видно, что разброс величин в исходной конструкции был высок. За счет проведенной оптимизации конструкции удалось снизить максимальный разброс температур внутри конструкции примерно в 6 раз, что обеспечивает попадание в оптимальный диапазон температур. Существенное улучшение распределения температур позволило уменьшить время насыщения (целевое давление в окончательной конструкции достигается к 27500 секунде, против 30300 секунд у исходной) и повысить однородность достигнутой степени насыщения в течение всего времени технологической операции. В исходной конструкции кроме высокой неоднородности степени насыщения наблюдается

также существенное недонасыщение в некоторых областях. В окончательной конструкции к моменту выхода (27500 секунд) на максимальное давление почти весь объем продукта имеет степень насыщения согласно требованиям заказчика, а к моменту времени ~40000 секунд можно считать, что степень насыщения выравнивается до уровня, который определяется давлением и температурой согласно фазовой диаграмме.



а) исходная конструкция



б) окончательная конструкция

Рис. 9. Графики давлений

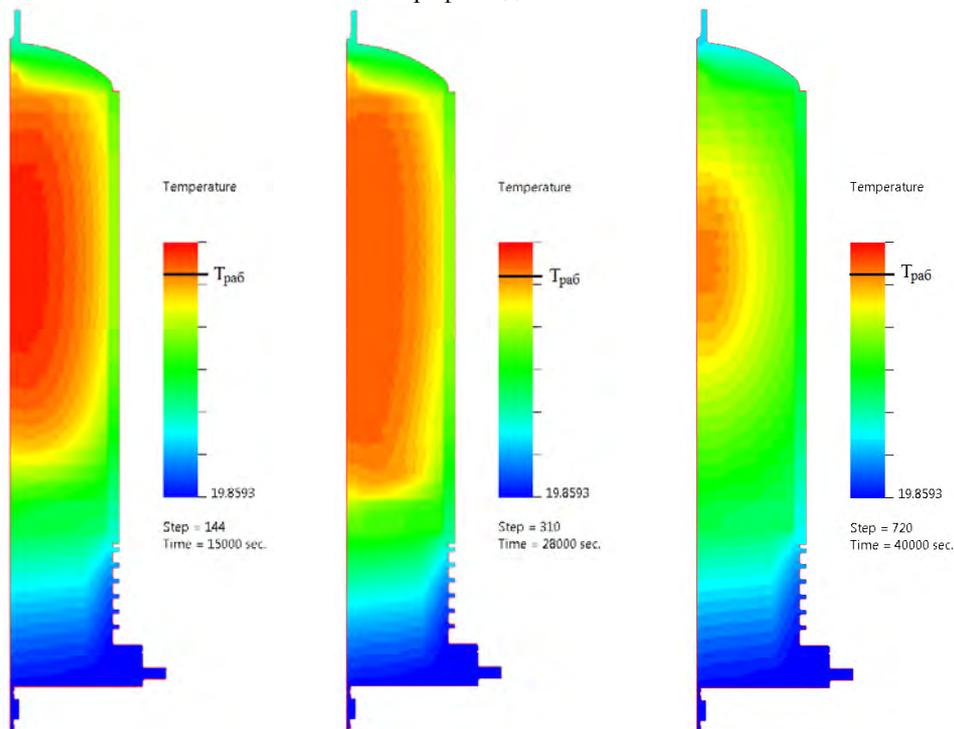


Рис. 10. Температурные поля на момент времени 15000, 28000, 40000 секунд, исходная конструкция

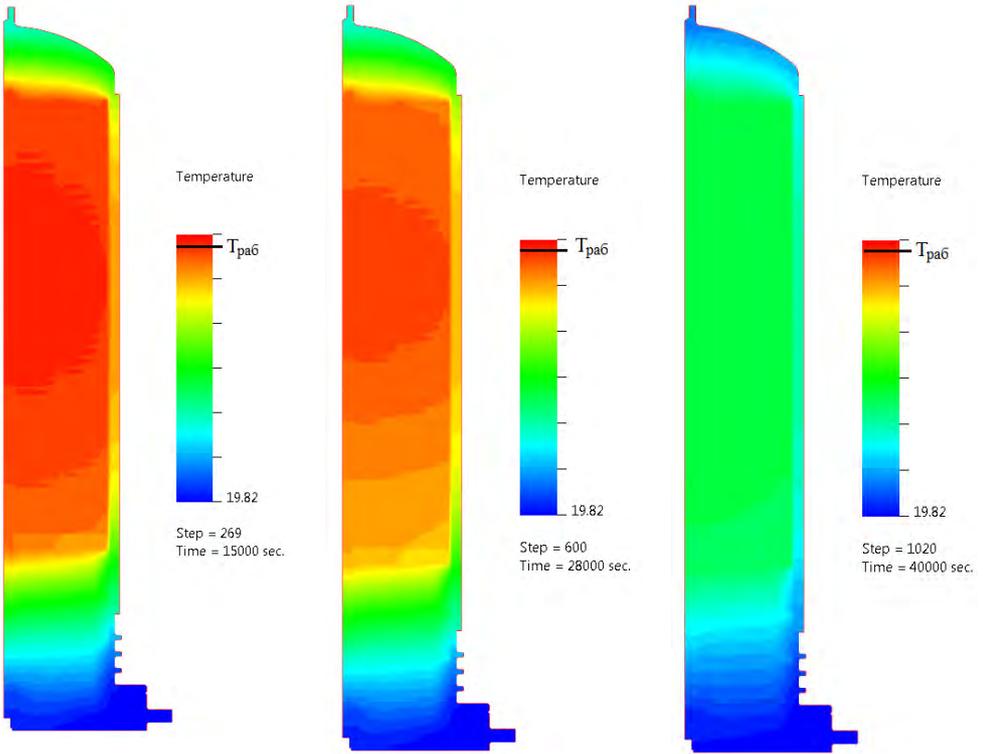


Рис. 11. Температурные поля на момент времени 15000, 28000, 40000 секунд, окончательная конструкция

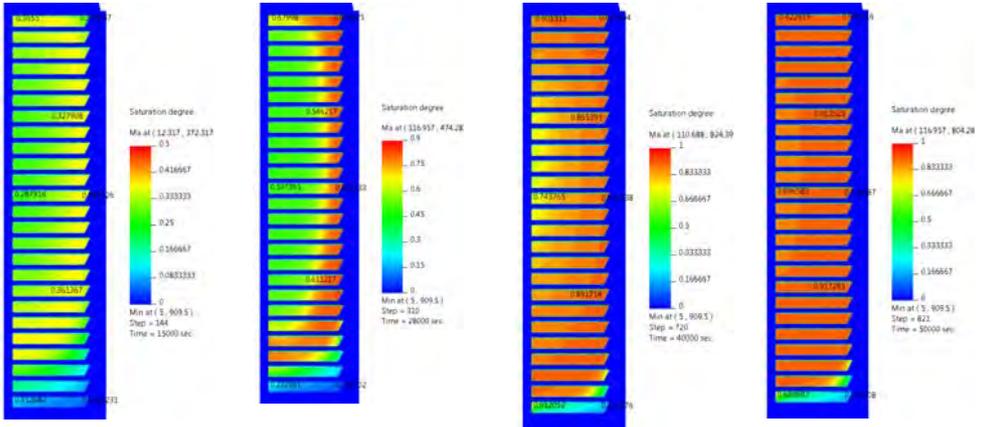


Рис. 12. Степени насыщения на момент времени 15000, 28000, 40000, 50000 секунд, исходная конструкция

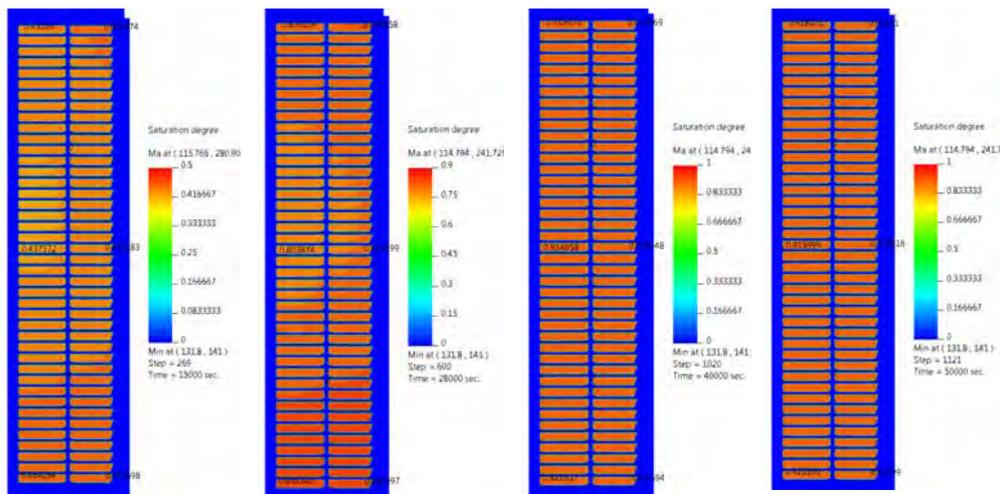


Рис. 13. Температурные поля на момент времени 15000, 28000, 40000, 50000 секунд, окончательная конструкция

Отметим, что некоторая разница в степенях насыщения на рис. 17 в период с 15000 до 33000 секунд определяется разницей кинетики ввиду разницы температур.

### Этап охлаждения

Этап охлаждения до температур менее 100 °С только за счет передачи тепла на корпус и далее в среду занимает более 20000 секунд. Поэтому для уменьшения времени остывания возможно прокачивать гелий через газостат и теплообменник. Ниже приведем оценки работы теплообменника.

Выбранный теплообменный аппарат (далее теплообменник) представляет собой набор из тонких стальных трубок длиной 1 метр. Внутри трубок подается горячий газ, снаружи трубки охлаждаются водой. Газ внутри теплообменника может двигаться по всем трубкам в одном направлении (однопроходный теплообменник) или только по части трубок в одном направлении, а по другой части трубок в другом направлении (двухпроходный теплообменник). Параметры газа приведены в табл. 5 ниже. Необходимо было оценить эффективность работы данного теплообменника на приведенных режимах с тем, чтобы эти данные использовать на этапе расчета охлаждения газостата.

Сложностью данной задачи является расчет изменения температуры газа при течении вдоль трубок при необходимости учета сильной нелинейной зависимости параметров газа от температуры. Изменение параметров газа сильно может менять характер течения газа и как следствие коэффициент теплообмена со стенками трубок. Полноценное решение данной задачи требует одновременного решения 3-х мерной задачи газодинамики и теплопереноса для достаточно сложной конструкции.

Таблица 5

## Параметры газа на входе в теплообменник

№	Газ	Температура, °С		Скорость потока, л/с	
		Вход	Выход	Мин.	Макс.
1	Водород	$T_{\text{макс}}$	<100	1	37
2	Гелий	$T_{\text{макс}}$	<100	1	37

Поскольку требовалось сделать оценку работы, т. е. достаточно грубо оценить режим работы данного теплообменника, то расчет производился следующим образом. Сначала оценивался коэффициент теплоотдачи для различных крайних режимов течения газа в одной трубке. Далее оценивались процессы теплопередачи в последовательном наборе сегментов массива трубок вдоль теплообменника.

Расчетные инженерные формулы для определения коэффициентов теплоотдачи для случая течения газа и жидкости внутри круглой трубы приведены в книге [5]. Кинематическая вязкость, теплоемкость и теплопроводность водорода и гелия аппроксимировались по данным для нескольких температур. Зависимость вязкости и теплопроводности от давления в расчетах не учитывалась.

Для оценки режима течения сначала определялись значения чисел подобия Рейнольдса, Прандтля и Гретца. Определенный по числам подобия режим течения определял значения коэффициентов  $C$ ,  $m$ ,  $n$ ,  $K$  в формуле для вычисления числа Нуссельта ( $Nu$ ), значение которого можно использовать для определения коэффициента теплоотдачи ( $\alpha$ , Вт/м<sup>2</sup>·К):

$$Nu = \frac{\alpha \cdot d}{\lambda} = C \cdot Re^m \cdot Pr^n \cdot K.$$

Значения коэффициентов, числа Нуссельта и вычисленные значения коэффициентов теплоотдачи для некоторых температур приведены в табл. 6. Было установлено, что почти во всем диапазоне условий реализуется ламинарный режим течения в длинной трубке, при котором число Нуссельта и коэффициент теплоотдачи зависят только от температуры и от характера газа, но не от скорости потока и размеров трубок. Только при низких температурах и высокой объемной скорости подачи водорода реализуется режим ламинарного течения в короткой трубке, при котором важны геометрические размеры трубки и скорость потока.

После того как были вычислены коэффициенты теплоотдачи можно оценить работу теплообменника. Как было указано выше, ввиду сложности задачи производилась оценка процессов теплопередачи в последовательном наборе сегментов массива трубок вдоль теплообменника.

Рассматривался массив трубок, разделенный по длине на 1000 равных частей. Для каждой части трубки рассчитывались: температура газа; плотность газа; масса газа; полная и удельная энергия газа; время нахождения порции газа в части трубки с учетом охлаждения и увеличения плотности газа; коэффициент теплоотдачи; температура стенки трубки и воды; энергия, переданная материалу стенки трубки и воде; потеря удельной энергии газом и пе-

реданная тепловая мощность. Ввиду большой теплоемкости воды и относительно малых тепловых потоков, скорость подачи воды в теплообменник может быть выбрана порядка 0,05–0,1 л/с (в крайних случаях до 0,5 л/с). При таких условиях и ввиду высоких коэффициентов теплоотдачи между стенками трубок и водой, разность температур между стенками трубок и водой будет минимальной, что отражено в расчетах в виде равенства температур стенки трубок и воды. Использовалась линейная интерполяция теплофизических характеристик.

Таблица 6

Значения коэффициентов в формуле и числа Нуссельта, вычисленные значения коэффициентов теплоотдачи

№	Параметр		Режим течения		
			Ламинарный поток в длинной трубе (Re<2000 и Gz<10)	Ламинарный поток в короткой трубе (Re<2000 и Gz>10)	
1	Коэффициент C		3,66	1,86	
2	Степень m		0	1/3	
3	Степень n		0	1/3	
4	Коэффициент K		1	$\left(\frac{d}{L}\right)^{\frac{1}{3}} \left(\frac{\mu}{\mu_{\text{стенка}}}\right)^{0,14}$	
5	Число Нуссельта $Nu = \frac{\alpha \cdot d}{\lambda} = C \cdot Re^m \cdot Pr^n \cdot K$		3,66 (кроме водорода при V <sub>газа</sub> за сек. < 35,5 л/с и T = 20 °C)	4,39 (для водорода при V <sub>газа</sub> за сек. < 35,5 л/с и T = 20 °C)	
6	Коэффициент теплоотдачи α, Вт/м·К	водород	T = 20 °C	47,58	57,19
			T = 0,5·T <sub>раб.</sub>	82,35	–
			T = T <sub>раб.</sub>	107,71	–
		гелий	T = 20 °C	39,21	–
			T = 0,5·T <sub>раб.</sub>	58,82	–
			T = T <sub>раб.</sub>	77,91	–

Для более точного моделирования тепловых процессов в установке при охлаждении необходимо иметь оценку зависимости тепловой мощности охлаждения от температуры газа на входе при различных расходах газа. Данные расчеты представлены в табл. 7 и использованы в расчетах режимов охлаждения.

Для окончательной конструкции газостата был произведен расчет охлаждения с рабочих температур в конце этапа насыщения (30000 секунд) до температур ниже 100 °C. При этом использованы допущения, что через газостат прокачивается 18,5 л/с гелия (средний расход), который успевает внутри газостата нагреться до температуры внутренних частей газостата и таким образом охладить их. Расчет выполнялся аналогично предыдущим этапам. Параметры внутренней среды газостата соответствовали гелию при рабочих

температурах. Охлаждение гелием моделировалось в виде теплопоглощения на охлаждаемых внутренних деталях газостата. Удельное теплопоглощение задавалось в зависимости от температуры согласно табл. 7 (скорость гелия 18,5 л/с) и объема охлаждаемых деталей. В качестве начальных условий было взято распределение температур с этапа насыщения на момент времени 30000 секунд. Графики изменения температур в различных точках (согласно рис. 1) окончательной конструкции приведены на рис. 14.

Таблица 7

Режимы работы теплообменника при различных температурах газа на входе

№	Газ	Вариант расчета	Параметр	Температура газа на входе, % от рабочей температуры					
				100	83,8	67,7	51,6	35,5	19,4
1	Н	Малый расход газа - 1 л/с , расход воды - 0,1 л/с	Тепловая мощ-ть, кВт	0,78	0,65	0,52	0,39	0,26	0,13
2		Средний расход газа - 18,5 л/с , расход воды - 0,1 л/с	Тепловая мощ-ть, кВт	13,60	11,28	8,98	6,70	4,44	2,20
3		Большой расход газа - 37 л/с , расход воды - 0,1 л/с	Тепловая мощ-ть, кВт	24,43	20,13	15,89	11,72	7,65	3,72
4		Большой расход газа - 37 л/с , расход воды - 0,5 л/с	Тепловая мощ-ть, кВт	25,99	21,40	16,87	12,43	8,10	3,93
5	He	Малый расход газа - 1 л/с , расход воды - 0,1 л/с	Тепловая мощ-ть, кВт	0,56	0,47	0,37	0,28	0,19	0,09
6		Средний расход газа - 18,5 л/с , расход воды - 0,1 л/с	Тепловая мощ-ть, кВт	9,87	8,22	6,56	4,92	3,27	1,63
7		Большой расход газа - 37 л/с , расход воды - 0,1 л/с	Тепловая мощ-ть, кВт	17,90	14,81	11,75	8,72	5,74	2,82
8		Большой расход газа - 37 л/с , расход воды - 0,5 л/с	Тепловая мощ-ть, кВт	18,76	15,51	12,30	9,12	6,00	2,95

Температура от времени

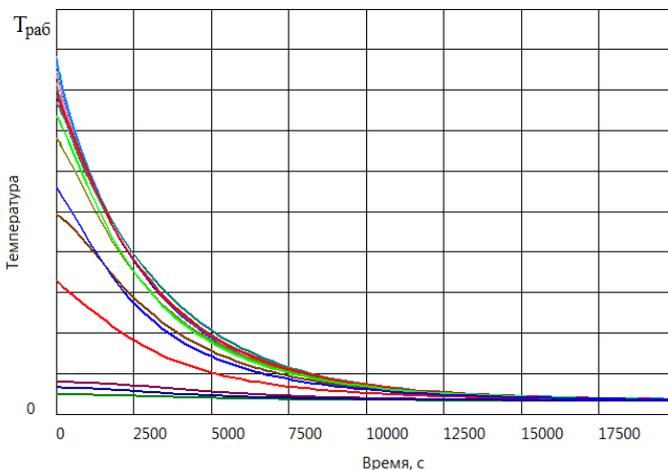


Рис. 14. График изменения температур при остывании

Из приведенных графиков видно, что подобное охлаждение гелием позволяет существенно сократить время остывания газостата. К моменту времени 10000 секунд можно считать охлаждение законченным. Еще более эффективным остывание можно сделать посредством принудительного обдува корпуса газостата снаружи, но при этом следует помнить о том, что сильное охлаждение внешних слоев корпуса может привести к недопустимым напряжениям в корпусе ввиду больших градиентов температуры.

Стоит отметить, что здесь принято допущение о быстрой передаче тепла от металлических внутренних частей газостата газу. В реальности нагрев газа внутри газостата, скорее всего, будет происходить медленнее. Поэтому стоит ожидать меньшей эффективности охлаждения, чем в расчете. В любом случае стоит ожидать снижение времени охлаждения в 2 раза.

### Заключение

В результате проведенных расчетных работ была оптимизирована конструкция газостата, входящего в состав установки для получения дроби гидрированной титановой, и показано следующее.

1) Окончательный вариант конструкции газостата обеспечивает достаточно равномерное распределение температур внутри массива чашек и поддержание температуры всех чашек в оптимальном диапазоне в течение всего процесса насыщения.

2) Выбранная конструкция газостата позволяет достичь заданного весового содержания водорода в дроби гидрированной титановой за время порядка 28000 секунд. Донасыщение и окончательное выравнивание весового содержания водорода происходит за время порядка 35000 секунд.

3) Согласно результатам моделирования длительность этапов составляет:

- нагрева и активации – 15000–18000 с;
- насыщения – 28000–35000 с;
- охлаждения – 5000–15000 с (в зависимости от выбранного режима).

Что позволяет провести весь технологический цикл гидрирования за время 48000–68000 секунд (13,3–18,9 часа). То есть полный технологический цикл с учетом времени на обслуживание установки и перезагрузки продукта может быть установлен 24 часа.

4) Выбранный для использования в установке теплообменник позволяет утилизировать значительные количества тепла и, таким образом, сократить время охлаждения газостата более чем в 2 раза на умеренных режимах работы.

**Список литературы**

1. В. И. Павленко, Ш. М. Рахимбаев, В. М. Береснев, Д. А. Колесников, И. И. Кирияк. Бетон биологической защиты для ядерных реакторов РБМК // ISSN 1562-6016. ВАНТ. № 2(78). 2012.
2. Биологическая защита ядерных реакторов: Справочник / Сокр. пер. с англ. // Под ред. Ю. А. Егорова. М.: Атомиздат, 1965, 328 с.
3. Тепловые свойства веществ // Справочная таблица. М.: ЦНИИ-атоминформ, 1979.
4. A. San-Martin, F. D. Manchester. The H-Ti (Hydrogen-Titanium) System // Bulletin of Alloy Phase Diagrams, vol. 8, N 1, 1987.
5. Х. Уонг Основные формулы и данные по теплообмену для инженеров // М.: Атомиздат, 1979.