



УДК: 621.039.736

DOI: 10.26277/SECNRS.2021.100.2.003

© 2021. Все права защищены.

## ГРАФИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ОБОСНОВАНИЮ БЕЗОПАСНОСТИ ПРОЦЕССА ОСТЕКЛЫВАНИЯ ВЫСОКОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ В ИНДУКЦИОННЫХ ПЕЧАХ С ВОДООХЛАЖДАЕМЫМИ ТИГЛЯМИ

Соколов И. П.\* , д. х. н. (isokolov@secnrs.ru),  
Понизов А. В.\* (ponizov@secnrs.ru),  
Шарафутдинов Р. Б.\* , к. т. н. (charafoutdinov@secnrs.ru)

Статья поступила в редакцию 18 января 2021 г.

### Аннотация

В настоящее время захоронение высокоактивных радиоактивных отходов (ВАО) планируется осуществлять в стеклоподобной матрице. Перспективным способом получения остеклованных ВАО является осуществление процесса в индукционных печах с водоохлаждаемыми тиглями (ИПХТ). Цель статьи – представление результатов по разработке графического подхода для обоснования безопасных условий эксплуатации ИПХТ применительно к осуществлению процесса остекловывания ВАО, который базируется на установлении факторов, приводящих к нарушению нормальной эксплуатации ИПХТ, и представлении на совмещенной диаграмме зависимостей между параметрами, важными для безопасности. Проведен анализ совокупности потенциально возможных нарушений нормальной эксплуатации ИПХТ. Предложена схема траекторий постулируемых аварийных событий. Предложены обобщенные диаграммы зависимостей между параметрами осуществления процесса остекловывания ВАО в ИПХТ: температурой расплава стекла, мощностью индуктора, расходом и температурой охлаждающей воды, давлением на напорном трубопроводе, внутренним диаметром трубок тигля. Проведен анализ предлагаемых обобщенных диаграмм, и приведена методология определения с их помощью диапазонов изменения контролируемых параметров для обеспечения нормальной эксплуатации ИПХТ и для обоснования эксплуатационных пределов и пределов безопасной эксплуатации установок по остекловыванию ВАО в ИПХТ.

► **Ключевые слова:** высокоактивные радиоактивные отходы, технология остекловывания, индукционная печь с водоохлаждаемым тиглем, графический подход, обоснование безопасности.

\* Федеральное бюджетное учреждение «Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности», Москва, Россия.

## THE GRAPHIC APPROACH TO JUSTIFICATION OF HIGH-LEVEL WASTE VITRIFICATION IN COLD CRUCIBLE INDUCTION MELTER

Sokolov I. P.\*, D. Sc.,  
Ponizov A. V.\*,  
Sharafutdinov R. B.\*, Ph. D.

Article is received on January 18, 2021

### *Abstract*

*Currently, a high-level waste (HLW) is being planned to be disposed in a glass matrix. A promising HLW vitrifying method is melting in cold crucible. The purpose of the article is to present a developed graphical approach to justify the safe operational conditions of the HLW vitrification in cold crucible, which is based on the identification of factors leading to disruption of the normal operation. Also the purpose is to represent the dependencies between the parameters important for safety in the combined diagram. The analysis of the possible failures of the normal operation of the cold crucible is carried out. A scheme of trajectories of the failures is proposed. Generalized diagrams of the dependencies between the parameters of the HLW vitrification process in the cold crucible are proposed: the melted matrix temperature, the inductor power, the flow rate and the temperature of the cooling water, the operating pressure in the feeding pipeline and the inner diameter of the crucible pipes. The methodology based on the carried out analysis of the proposed generalized diagrams is presented for determining the deviation ranges of the governing parameters to ensure the normal operation of the cold crucible and to justify the operational limits and conditions of the HLW vitrification in the cold crucible.*

► **Keywords:** *high-level waste, glass technology, cold crucible induction melter, graphic approach, safety justification.*

---

\* Scientific and Engineering Centre for Nuclear and Radiation Safety, Moscow, Russia.

## Введение

В настоящее время к наиболее приемлемому способу захоронения высокоактивных радиоактивных отходов (ВАО) относится их захоронение в стеклоподобной матрице.

Перспективным направлением аппаратурного оформления процесса остекловывания ВАО является его осуществление в индукционных печах с водоохлаждаемыми тиглями (ИПХТ) [1–10].

Основные достоинства применения ИПХТ для остекловывания ВАО обусловлены:

- компактностью оборудования, что упрощает вывод из эксплуатации установки;
- отсутствием взаимодействия расплава с охлаждаемыми стенкой и дном тигля, что ограничивает коррозию конструкционных материалов;
- высокоскоростным бесконтактным нагревом загрузки высокочастотным электромагнитным полем до требуемых температур варки стеклоподобного компаунда.

Систематизация информации о разработках и освоении способов остекловывания радиоактивных отходов в ИПХТ у нас в стране и за рубежом приведена в обзорах [11, 12]. Авторами проведен анализ публикаций и сообщений, в которых основное внимание уделено вопросам технической возможности остекловывания радиоактивных отходов в ИПХТ и нахождению условий для достижения приемлемых технологических показателей. При этом проблемы возможного нарушения нормальной эксплуатации и обеспечения безопасности, относящиеся к осуществлению данной технологии в промышленных условиях, по существу не рассматривались, хотя в [12] в общем виде была отмечена необходимость учета при использовании ИПХТ потенциальных опасностей, обусловленных: поражением электрическим током, воздействием электромагнитного поля высокой частоты, потерей охлаждения и повреждением водоохлаждаемых трубок, коррозией материалов, повышением давления, присутствием горючих веществ.

Это делает актуальным проведение обоснования безопасности установок по остекловыванию ВАО в ИПХТ и, в первую очередь, обоснования безопасности применения самого оборудования, представляющего потенциальную опасность.

Одним из возможных подходов для обоснования безопасности является графическое сопоставление параметров, важных для безопасности, позволяющее наглядно представить границы области безопасной эксплуатации.

Цель настоящей статьи – представление результатов по разработке графического подхода для обоснования безопасных условий эксплуатации ИПХТ применительно к осуществлению процесса остекловывания ВАО, разработанного на основе систематизации потенциальных опасностей, способных привести к нарушению нормальной эксплуатации.

## 1. Специфика потенциальных опасностей, связанных с применением индукционных печей с водоохлаждаемыми тиглями для остекловывания высокоактивных отходов

Использование графического подхода к обоснованию безопасности применения ИПХТ для остекловывания ВАО базируется на установлении факторов, приводящих к нарушению его нормальной эксплуатации.

Опыт использования установок ИПХТ для получения расплавов неактивного стекла и тугоплавких металлов, изложенный в [13, 14], позволяет выделить ряд контролируемых параметров, важных для обеспечения безопасности этих установок.

Повышенная потенциальная опасность применения ИПХТ обусловлена в значительной степени одновременным взаимодействием двух противоположных факторов:

- высокоскоростным выделением электромагнитной энергии в загрузке и тигле, обеспечивающим повышенную скорость их нагрева, которая регулируется изменением мощности индуктора;
- интенсивным охлаждением нагреваемых стенок и дна тигля, которое регулируется изменением расхода и давления охлаждающей воды.

В процессе эксплуатации установки для остекловывания ВАО в ИПХТ дополнительную потенциальную опасность могут представлять также нарушения нормальной эксплуатации таких технологических операций, как дозирование в тигель жидких радиоактивных отходов (ЖРО), слив расплава стекла из тигля в приемные контейнеры, транспортирование контейнеров с расплавом стекла, которые в настоящей работе не рассматриваются.

Анализ совокупности потенциально возможных нарушений нормальной эксплуатации ИПХТ позволил представить их взаимосвязь в виде схемы, приведенной на рис. 1. Исходными событиями таких нарушений могут быть ошибки персонала, отказы оборудования, внешние воздействия. Последовательности таких нарушений могут формировать траектории постулируемых аварий, способных возникать на установках остекловывания ВАО в ИПХТ.

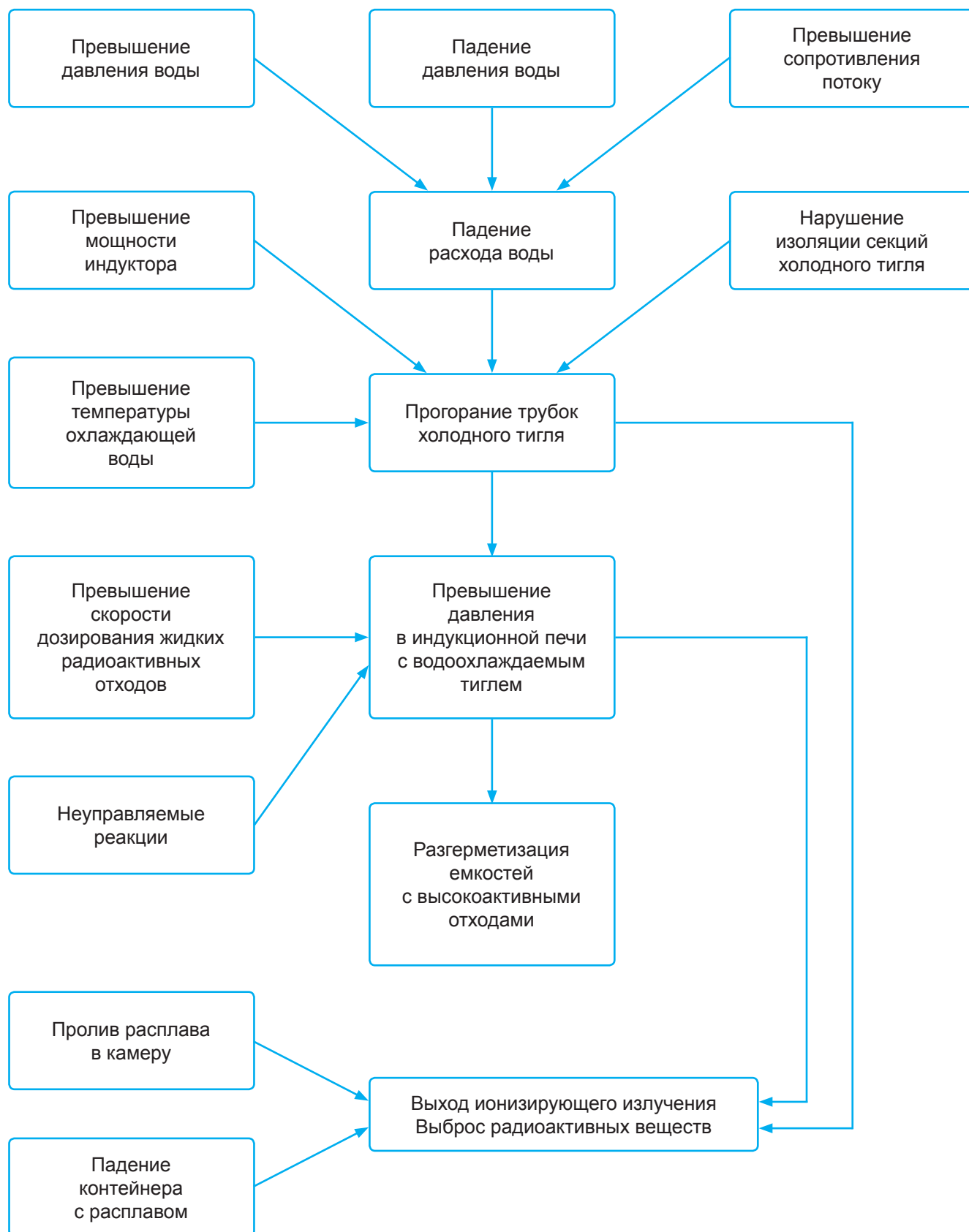


Рис. 1. Обобщенная схема направлений нарушений нормальной эксплуатации индукционных печей с водоохлаждаемыми тиглями

[Fig. 1. The generalized scheme of the cold crucible failures]

Как следует из рис. 1, опасное снижение расхода воды на охлаждение конструктивных элементов тигля может быть вызвано как чрезмерным понижением давления на напорном трубопроводе, так и его чрезмерным повышением, в результате которого нарушается герметичность арматуры и происходит снижение расхода воды, попадающей в тигель, из-за образования течей или разрыва трубопроводов. Опасное снижение расхода воды на охлаждение тигля на напорном трубопроводе может быть также обусловлено чрезмерным увеличением сопротивления потоку воды из-за образования твердых отложений внутри трубок тигля или образования в них газовых пробок (в том числе в случае значительного выделения и накопления в контурах охлаждения радиолитического водорода), приводящим к снижению пропускной способности каналов. Перечисленные обстоятельства относятся также и к нарушениям нормальной эксплуатации индуктора, расположенного вокруг тигля.

Чрезмерное снижение расхода охлаждающей воды и (или) значительное повышение мощности индуктора способны, в свою очередь, привести к прогоранию охлаждаемых конструктивных элементов установки остекловывания. Прогорание стенок тигля может быть также обусловлено нарушением изоляции между секциями тигля и возникновением между ними электрических пробоев.

В случае прогорания конструктивных элементов тигля произойдет контакт воды с расплавом стекла, приводящий к ее интенсивному испарению и росту давления в тигле, а также к попаданию радионуклидов в контур водяного охлаждения и их выходу за пределы защитной камеры. Повышение давления в ИПХТ возможно также при нарушении нормальной эксплуатации других технологических операций, осуществляемых на установке остекловывания ВАО: при чрезмерном превышении скорости дозирования ЖРО на поверхность расплава стекла, при протекании неуправляемых химических экзотермических реакций в случае попадания в ЖРО горючих и взрывоопасных веществ (органических компонентов, нитрата аммония и др.), а также при достижении критических условий воспламенения радиолитического водорода. При неблагоприятных условиях повышение давления в тигле может происходить в виде парового или теплового взрывов, приводящих к нарушению нормальной эксплуатации установки остекловывания с выходом радиоактивных веществ сверх установленных пределов.

Таким образом, можно сформулировать следующие положения, которые следует учитывать при определении безопасных условий осуществления процесса остекловывания ВАО в ИПХТ:

- соотношение между плотностью теплового потока при нагреве загруженного материала и тигля, определяемое мощностью индуктора (для данной частоты электромагнитного поля и электропроводности загрузки) и расходом охлаждающей воды и ее температуры, должно исключать прожог водоохлаждаемых стенок и дна тигля;
- расход воды, подаваемой на охлаждение конструктивных элементов ИПХТ, должен соответствовать давлению на напорном трубопроводе;
- скорость дозирования ЖРО на расплав стекла в ИПХТ должна исключать испарение воды в режиме парового взрыва;
- параметры газоочистного оборудования в процессе остекловывания ВАО в ИПХТ должны соответствовать максимальному газовыделению, выходящему из тигля, при максимальной производительности ИПХТ;
- интенсивность ионизирующего излучения ВАО не должна приводить к возникновению электрических пробоев между витками индуктора;
- при осуществлении процесса остекловывания ВАО в ИПХТ должно быть исключено протекание неуправляемых химических экзотермических реакций;
- конструкция ИПХТ не должна допускать попадания радиоактивных веществ в пространство защитной камеры сверх установленных пределов.

## **2. Типы зависимостей между параметрами индукционных печей с водоохлаждаемыми тиглями, важными для безопасности**

С учетом рассмотренных выше потенциальных опасностей к основным технологическим параметрам ИПХТ, важным для обеспечения безопасности, следует отнести:

- мощность индуктора, изменением значения которой обеспечивают необходимую температуру варки стекла;
- расход и давление воды, охлаждающей индуктор и тигель.

Для определения взаимосвязи критических значений этих параметров необходимо иметь информацию о типах зависимостей, существующих между ними.

Известно, что мощность электромагнитного поля, выделяемая в загрузке и затрачиваемая на ее

нагрев, характеризуется тепловым коэффициентом полезного действия, равным 15÷35 %, и сложным образом зависит от диаметра и высоты тигля, частоты электромагнитного поля и удельного электрического сопротивления материала загрузки [13].

В связи со снижением неоднородности температурного поля при образовании и перемешивании расплава в ИПХТ в первом приближении допустимо принять, что применительно к тиглю заданного диаметра и фиксированной частоте электромагнитного поля изменение средней температуры расплава стекла пропорционально мощности индуктора.

Характер взаимосвязи между мощностью индуктора и расходом охлаждающей воды описан в [14], где рассмотрены три режима теплообмена на охлаждаемой водой поверхности тигля:

- при относительно низкой тепловой нагрузке перенос тепла осуществляется одновременно конвекцией и теплопроводностью;
- с увеличением тепловой нагрузки происходит пузырьковое кипение у поверхности трубки с конденсацией образующегося пара в ядре потока;
- при дальнейшем увеличении плотности теплового потока пузырьковый слой препятствует проникновению жидкости к горячей поверхности, и возникает режим пленочного кипения, когда охлаждаемая поверхность отделяется от жидкости сплошной пленкой пара, что вызывает быстрый рост температуры поверхности.

Тепловые нагрузки, соответствующие наступлению пленочного режима, называют критическими [14].

В [14] приведены три линейные зависимости между плотностью теплового потока на стенку тигля и расходом охлаждающей воды, которые являются границами областей конвективного теплообмена, пузырькового кипения, пленочного кипения и наступающего прожога стенки тигля. В соответствии с ними при уменьшении расхода воды режим теплообмена последовательно переходит от конвективного к прожогу стенок тигля.

В [14] приведены также зависимости критических значений плотности теплового потока при пузырьковом кипении от расхода охлаждающей воды, которые представляют собой серию находящихся друг под другом прямых линий, соответствующих определенным значениям температуры воды. При этом с увеличением температуры воды критические значения плотности теплового потока для фиксированного значения расхода воды, соответственно, снижаются.

Характер взаимосвязи между расходом охлаждающей воды в ИПХТ, давлением на напорном трубопроводе ( $P$ ) и диаметром трубок тигля ( $d$ ) оценивали на основании закономерностей, приведенных в [15], где с учетом соответствующих упрощений расход охлаждающей воды пропорционален произведению:  $P^{1/2}d^{1/2}$ .

Рассмотренные типы взаимосвязи между параметрами ИПХТ, важными для обеспечения безопасности, были использованы для графического подхода к обоснованию безопасного осуществления плавки стекла ВАО в ИПХТ.

### 3. Диаграммы критических значений параметров индукционных печей с водоохлаждаемыми тиглями

Предлагаемый графический подход к обоснованию безопасных условий осуществления технологической операции плавки стекла в ИПХТ включает построение и анализ совмещенных диаграмм, на которых изображены три типа зависимостей (для фиксированного значения температуры охлаждающей воды):

- регистрируемой температуры расплава стекла ( $T_p$ ) от мощности индуктора ( $N$ );
- расхода охлаждающей воды ( $v$ ) от давления в распределяющем коллекторе контура охлаждения ИПХТ ( $P$ );
- требуемого расхода воды для охлаждения тигля ( $v$ ) от мощности индуктора ( $N$ ).

В общем виде базовая совмещенная диаграмма  $N-T_p-P-v$  показана на рис. 2.

На этой диаграмме схематично показано, что (при сохранении неизменными значений других технологических параметров):

- температура расплава увеличивается с увеличением мощности индуктора;
- расход охлаждающей воды приблизительно пропорционален  $P^{1/2}$ ;
- условная пунктирная линия соответствует образованию и увеличению течи в водоохлаждаемом контуре до входа в ИПХТ вплоть до разрыва трубопровода;
- ниже линии I реализуется конвективный режим теплообмена;
- между линиями I и II реализуется режим пузырькового кипения;
- между линиями II и III реализуется режим пленочного кипения;
- выше линии III происходит прожог стенок (дна) тигля.

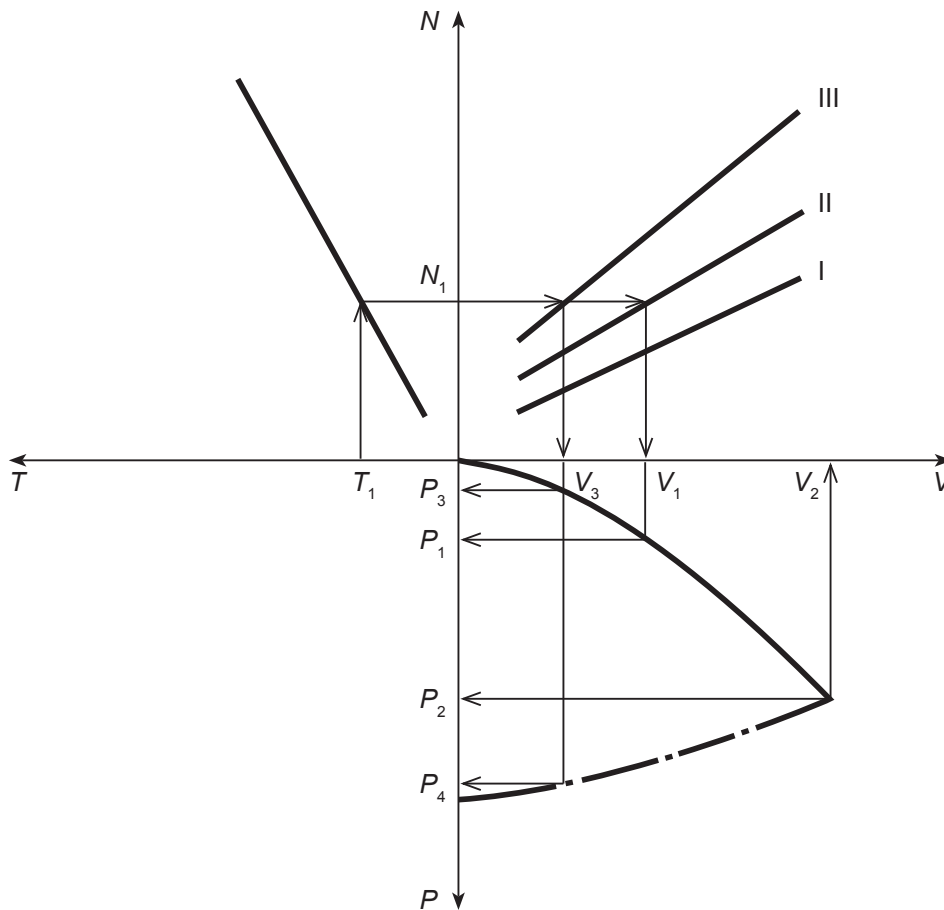


Рис. 2. Тип диаграммы взаимосвязи критических значений параметров плавки в индукционных печах с водоохлаждаемыми тиглями

[Fig. 2. The type of diagrams of the relationships between vitrification critical parameters in the cold crucibles]

Согласно диаграмме, представленной на рис. 2, значение температуры расплава  $T_1$  соответствует предельному значению для осуществления нормальной эксплуатации ИПХТ, то есть устанавливаемому эксплуатационному пределу (ЭП) по температуре расплава.

Значение  $T_1$  должно соответствовать значению мощности индуктора  $N_1$ , которое служит ориентиром для установления ЭП по применяемой мощности индуктора с учетом требуемого запаса на реагирование систем управления нормальной эксплуатации.

Пересечение значения  $N_1$  с линией II определяет предельное (критическое) значение для установления нижнего ЭП по расходу охлаждающей воды  $v_1$ .

Для обеспечения неперевышения значения  $v_1$  предельным (критическим) значением для установления нижнего ЭП по давлению на напорном трубопроводе является значение  $P_1$ .

При установлении критического значения давления на напорном трубопроводе  $P_2$ , ниже которого исключена возможность образования течи в контуре охлаждения, максимально возможный расход воды составит  $v_2$ . Этому значению соответствует критическое значение верхнего ЭП по расходу воды.

Таким образом, диапазоны изменения рассматриваемых параметров для обеспечения нормальной эксплуатации ИПХТ (с учетом установления запаса безопасности) должны соответствовать условиям:  $T_p < T_1$ ;  $N < N_1$ ;  $P_1 < P < P_2$ ;  $v_1 < v < v_2$ .

Данная диаграмма содержит также ориентиры для установления пределов безопасной эксплуатации (ПБЭ) по указанным параметрам, превышение которых может привести к аварии на установке остекловывания ВАО.

Если принять ПБЭ по мощности индуктора за  $N_1$ , то, согласно рис. 2, прогорание стенки (дна) тигля и выход радионуклидов за пределы ИПХТ произойдет в случае расхода воды меньшего, чем  $v_3$ . Этому значению расхода охлаждающей воды соответствуют два критических значения давления на напорном трубопроводе:  $P_3$  и  $P_4$  (в случае возникновения течи в контуре водоохлаждения и ограничения потока воды на охлаждение индуктора и тигля).

Соответственно этому ориентирами для установления ПБЭ по рассматриваемым параметрам могут служить значения:  $T = T_1$ ;  $N = N_1$ ;  $v > v_3$ ;  $P > P_3$ ;  $P < P_4$ . При этом, с учетом приведенных выше ориентиров, для установления ЭП можно уточнить

ограничения для установления ПБЭ по расходу воды и давлению на напорном трубопроводе:  $v_3 < v < v_1$ ;  $P_3 < P_{min} < P_1$  и  $P_{max} < P_2$ .

Приведенная на рис. 2 базовая диаграмма может быть использована также при учете других параметров ИПХТ, важных для безопасности.

На рис. 3 показан вариант развития базовой диаграммы при изменении температуры охлаждающей воды от исходного значения  $T_0$  до более высокого значения  $T_x$  и уменьшении внутреннего диаметра водоохлаждаемых трубок тигля от исходного значения  $d_0$  до  $d_x$  вследствие образования на внутренних поверхностях твердых отложений. В данном случае режим водяного охлаждения соответствовал границе между пузырьковым и пленочным кипением.

Как следует из рис. 3, при прочих равных условиях увеличение температуры охлаждающей воды и уменьшение пропускной способности воды в трубках тигля приводят к уменьшению диапазона изменения расхода воды, который обеспечивает нормальную эксплуатацию ИПХТ:  $(v_2 - v_x) < (v_2 - v_1)$ ,  $(v_y - v_1) < (v_2 - v_1)$  и при совместном изменении температуры воды и диаметра канала:  $(v_x - v_y) < (v_2 - v_1)$ .

Анализ приведенных диаграмм показывает, что предлагаемый графический подход может быть полезен при определении безопасных условий осуществления процесса остекловывания ВАО в ИПХТ и при установлении ЭП и ПБЭ для данного процесса. Для его практического применения требуется знание реальных зависимостей между приведенными на диаграммах параметрами для конкретных конструкций ИПХТ и режимов их работы.

### Выводы

1. Проведен анализ совокупности потенциально возможных нарушений нормальной эксплуатации ИПХТ. Предложена схема траекторий постулируемых аварийных событий при нарушении нормальной эксплуатации ИПХТ.

2. Предложен графический подход к определению безопасных условий осуществления процесса остекловывания ВАО в ИПХТ на основе построения и анализа совмещенных диаграмм, характеризующих взаимосвязь между параметрами процесса, важными для безопасности.

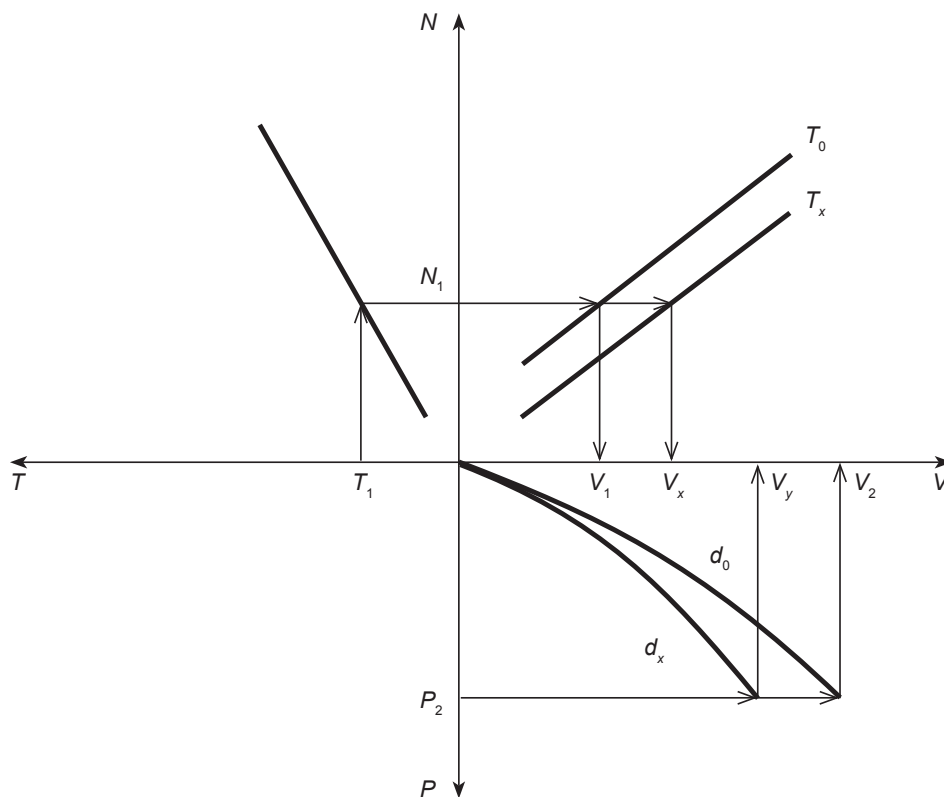


Рис. 3. Направления изменения области критических значений параметров при плавке в индукционных печах с водоохлаждаемыми тиглями

[Fig. 3. The directions for changing the area of critical parameter values during melting in the cold crucibles]



## Литература

1. Козлов П. В., Ремизов М. Б., Макаровский Р. А. и др. Основные подходы, опыт и проблемы переработки накопленных в емкостях жидких радиоактивных отходов сложного химического состава // Радиоактивные отходы. 2018. № 4 (5). С. 55–66.
2. Сорокин В. Т., Павлов Д. И., Баринов А. С., Кашеев В. А., Мусатов Н. Д. Научные и проектные основы остекловывания жидких радиоактивных отходов АЭС с ВВЭР-1200 // Радиоактивные отходы. 2020. № 2 (11). С. 56–65.
3. Сорокин В. Т. Обоснование безопасности захоронения солевого плава, образующегося на установках глубокого упаривания АЭС, размещенного в контейнерах НЗК-150-1,5П // Радиоактивные отходы. 2019. № 2 (7). С. 31–40.
4. Захарова К. П., Химченко О. М., Суханов Л. П. и др. Разработка технологического режима цементирования солевых концентратов Волгодонской АЭС // Атомная энергия. 2007. Т. 103. Вып. 5. С. 309–314.
5. Ожован М. И., Полуэктов П. П. Применение стекол при иммобилизации радиоактивных отходов // Безопасность окружающей среды. 2010. № 1. С. 112–115.
6. Миунг-Джай Сонг. Остеклованные отходы // Атомная техника за рубежом. 2003. № 10. С. 14–18.
7. Алой А. С., Трофименко А. В., Кольцова Т. И. и др. Физико-химические характеристики остеклованных модельных ВАО ОДЦ ГХК // Радиоактивные отходы. 2018. № 4 (5). С. 67–75.
8. Лопух Д. Б., Алой А. С., Мартынов А. В. Развитие и реализация электротехнологий для кондиционирования радиоактивных отходов в России // Индукционный нагрев. 2016. № 2 (16). С. 4–9.
9. Лопух Д. Б., Скриган И. Н., Вавилов А. В., Мартынов А. П. Инновационная индукционная печь для остекловывания высокоактивных отходов // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Материаловедение и новые материалы. 2018. Вып. 4 (95). С. 49–61.
10. Лопух Д. Б., Вавилов А. В., Мартынов П. П., Скриган И. Н. Новая российская концепция установки остекловывания радиоактивных отходов методом индукционной плавки в холодных тиглях // Электротехника. 2019. № 12. С. 50–55.
11. Elliot M. L. Letter Report: Cold Crucible Melter Assessment. Prepared for US. Department of Energy under Contract DE-AC06-76RLO. Pacific Northwest National Laboratory, Richland, Washington, 1996. – 58 p.
12. Gombert D., Richardson J. G. Cold Crucible Induction Melter Technology: Results of Laboratory Directed Research and Development. Idaho National Engineering and Environmental Laboratory. Idaho, 2001. – 46 p.
13. Петров Ю. Б. Индукционная плавка окислов. Л.: Энергоатомиздат, 1983. – 104 с.
14. Тир Л. Л., Губченко А. П. Индукционные плавильные печи для процессов повышенной точности и чистоты. М.: Энергоатомиздат, 1988. – 120 с.
15. Айнштейн В. Г., Захаров М. К., Носов Г. А. и др. Общий курс процессов и аппаратов химической технологии. Кн. 1. М.: Логос-Высшая школа, 2003. – 912 с.

## References

1. Kozlov P. V., Remizov M. B., Makarovskiy R. A. et al. Osnovnyye podkhody, opyt i problemy pererabotki nakoplennykh v emkostyakh zhidkikh radioaktivnykh otkhodov slozhnogo khimicheskogo sostava [Basic approaches, experience and challenges in treatment of liquid radioactive waste compounds stored in tanks]. Radioaktivnye otkhody – Radioactive waste, 2018, no. 4 (5), pp. 55–66 [in Russian].
2. Sorokin V. T., Pavlov D. I., Barinov A. S., Kashcheyev V. A., Musatov N. D. Nauchnye i proektnye osnovy osteklovyvaniya zhidkikh radioaktivnykh otkhodov AEHS s VVEHR-1200 [Scientific and design bases for the vitrification of liquid radioactive waste generated at VVER-1200 NPPs]. Radioaktivnye otkhody – Radioactive waste, 2020, no. 2 (11), pp. 56–65 [in Russian].
3. Sorokin V. T. Obosnovanie bezopasnosti zakhoroneniya solevogo plava, obrazuyushchegosya na ustanovkakh glubokogo uparivaniya AEHS, razmeshchennogo v konteynerakh NZK-150-1,5P [Rationale for the safe disposal of NPP deep evaporation VAT residue in NZK-150-1.5P containers]. Radioaktivnye otkhody – Radioactive waste, 2019, no. 2 (7), pp. 31–40 [in Russian].

4. Zakharova K. P., Khimchenko O. M., Sukhanov L. P. et al. Razrabotka tekhnologicheskogo rezhima tsementirovaniya solevykh kontsentratov Volgodonskoï AEHS [Development of a cementation process for Volgodonsk NPP VAT residue]. *Atomnaya ehnergiya – Atomic Energy*, 2007, v. 103, issue 5, pp. 309–314 [in Russian].
5. Ozhovan M. I., Poluektov P. P. Primenenie stekol pri immobilizatsii radioaktivnykh otkhodov [Use of glass for radioactive waste immobilization]. *Bezopasnost' okruzhayushchei sredy – Safety of the environment*, 2010, no. 1, pp. 112–115 [in Russian].
6. Miung Jai Song. Osteklovannyye otkhody [Vitrified waste]. *Atomnaya tekhnika za rubezhom – Nuclear Engineering International*, 2003, no. 10, pp. 14–18 [in Russian].
7. Aloy A. S., Trofimenko A. V., Koltsova T. I. et al. Fiziko-khimicheskie kharakteristiki osteklovannykh model'nykh VAO ODTs GKHK [Physical and chemical properties of model HLW vitrified at MCC PDC]. *Radioaktivnye otkhody – Radioactive waste*, 2018, no. 4 (5), pp. 67–75 [in Russian].
8. Lopukh D. B., Aloy A. S., Martynov A. V. Razvitiye i realizatsiya ehlektrotekhnologii dlya konditsionirovaniya radioaktivnykh otkhodov v Rossii [Elaboration and deployment of electrical techniques for conditioning of radioactive waste in Russia]. *Induktsionnyi nagrev – Induction heating*, 2016, no. 2 (16), pp. 4–9 [in Russian].
9. Lopukh D. B., Skrigan I. N., Vavilov A. V., Martynov A. P. Innovatsionnaya induktsionnaya pech' dlya osteklovyvaniya vysokoaktivnykh otkhodov [An innovative induction melter for the vitrification of high-level waste]. *Voprosy atomnoi nauki i tekhniki. Ser. Materialovedenie i novye materialy – Challenges in Nuclear Science and Technology. Ser. Materials science and new materials*, 2018, issue 4 (95), pp. 49–61 [in Russian].
10. Lopukh D. B., Vavilov A. V., Martynov P. P., Skrigan I. N. Novaya rossiiskaya kontseptsiya ustanovki osteklovyvaniya radioaktivnykh otkhodov metodom induktsionnoi plavki v kholodnykh tiglyakh [Novel Russian concept of vitrifying radioactive waste in cold crucible induction melters]. *Электротехника – Elektrotekhnika*, 2019, no. 12, pp. 50–55 [in Russian].
11. Elliot M. L. Letter Report: Cold Crucible Melter Assessment. Prepared for U. S. Department of Energy under Contract DE-AC06-76RLO. Pacific Northwest National Laboratory, Richland, Washington, 1996, 58 p.
12. Gombert D., Richardson J. G. Cold Crucible Induction Melter Technology: Results of Laboratory Directed Research and Development. Idaho National Engineering and Environmental Laboratory. Idaho, 2001, 46 p.
13. Petrov Yu. B. (1983). Induktsionnaya plavka okislov [Induction melting of oxides]. Leningrad: Ehnergoatomizdat [in Russian].
14. Tyr L. L., Gubchenko A. P. (1988). Induktsionnye plavil'nye pechi dlya protsessov povyshennoi tochnosti i chistoty [Induction melters for high-accuracy and high-purity processes]. Moscow: Ehnergoatomizdat [in Russian].
15. Einstein V. G., Zakharov M. K., Nosov G. A. et al. (2003). Obshchii kurs protsessov i apparatov khimicheskoi tekhnologii [Basic course on chemical processes and facilities]. (Book 1). Moscow: Logos-Vysshaya shkola [in Russian].

### Сведения об авторах

*Соколов Иван Павлович*, главный научный сотрудник отдела безопасности предприятий топливного цикла, федеральное бюджетное учреждение «Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности» (107140, Москва, ул. Малая Красносельская, д. 2/8, корп. 5).

*Понизов Антон Владимирович*, начальник отдела безопасности предприятий топливного цикла, федеральное бюджетное учреждение «Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности» (107140, Москва, ул. Малая Красносельская, д. 2/8, корп. 5).

*Шарафутдинов Рашид Борисович*, заместитель директора, федеральное бюджетное учреждение «Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности» (107140, Москва, ул. Малая Красносельская, д. 2/8, корп. 5).

### Author credentials

*Sokolov Ivan Pavlovich*, Chief Researcher of Division for Safety of Fuel Cycle Facilities, Scientific and Engineering Centre for Nuclear and Radiation Safety (2/8, building 5, Malaya Krasnoselskaya str., Moscow, 107140), e-mail: isokolov@secnrs.ru.

*Ponizov Anton Vladimirovich*, Chief of Division for Safety of Fuel Cycle Facilities, Scientific and Engineering Centre for Nuclear and Radiation Safety (2/8, building 5, Malaya Krasnoselskaya str., Moscow, 107140), e-mail: ponizov@secnrs.ru.

*Sharafutdinov Rashed Borisovich*, Deputy Director, Scientific and Engineering Centre for Nuclear and Radiation Safety (2/8, building 5, Malaya Krasnoselskaya str., Moscow, 107140), e-mail: charafoutdinov@secnrs.ru.

### Для цитирования

*Соколов И. П., Понизов А. В., Шарафутдинов Р. Б.* Графический подход к обоснованию безопасности процесса остекловывания высокоактивных отходов в индукционных печах с водоохлаждаемыми тиглями // Ядерная и радиационная безопасность. 2021. № 2 (100). С. 29–39. DOI: 10.26277/SECNRS.2021.100.2.003.

### For citation

*Sokolov I. P., Ponizov A. V., Sharafutdinov R. B.* The graphic approach to justification of high-level waste vitrification in cold crucible induction melter. Nuclear and Radiation Safety, 2021, no. 2 (100), pp. 29–39. DOI: 10.26277/SECNRS.2021.100.2.003 [in Russian].

