

## Физическая аппаратура и её элементы

УДК 621.039.574

### Проблемы повышения стабильности работы нейтронных генераторов на вакуумных нейтронных трубках

А.А. Битулев, Г.С. Румянцев, С.В. Чуринов, Н.Н. Щитов

*Улучшение рабочих характеристик короткоимпульсных нейтронных генераторов на вакуумных нейтронных трубках в значительной мере ограничено именно трубкой. В данной статье рассмотрен круг проблем, связанных, прежде всего, с высокой нестабильностью нейтронного потока, обусловленной процессами в трубке, и возможные пути их решения.*

PACS: 52.50.Dg, 52.70.Nc, 52.80.Vp

*Ключевые слова:* импульсные нейтронные генераторы, вакуумная нейтронная трубка, ионный источник, импульсная, циклическая и долговременная стабильность.

#### Введение

Разработки частотных импульсных нейтронных генераторов (ИНГ) на вакуумных нейтронных трубках (ВНТ) ведутся во ФГУП «ВНИИА» почти 50 лет. В 60–80-х годах прошлого века был проведен комплекс научно-технических и опытно-конструкторских работ, в результате которых была создана концепция конструкции ИНГ, разработаны электрические схемы и исследованы различные режимы работы генератора, установлены связи параметров его электрической схемы и выходных характеристик.

На базе этих работ в 90-х годах были разработаны и в настоящее время производятся генераторы нейтронов типа ИНГ-10 (ИНГ-10–20–120, ИНГ-10–20–150), ИНГ-11, ИНГ-12. Они применяются в скважинной аппаратуре для проведения геофизических исследований нефтегазовых и урановых месторождений, а также других физических исследований.

В настоящее время потребности рынка ставят перед разработчиками ИНГ весьма серьезные задачи, а именно, повышение термостойкости до 175–200 °С, а также ресурса работы и стабильности нейтронного потока.

Целью данной работы является рассмотрение круга проблем, связанных, прежде всего, с высо-

кой нестабильностью нейтронного потока, обусловленной процессами в трубке, и исследование возможных путей их решения.

#### Характеристики стабильности.

##### Экспериментальные данные

Основной проблемой ИНГ на ВНТ является большая нестабильность нейтронного потока, причем трех видов:

- нестабильность нейтронного выхода в импульсе (численная характеристика — относительное среднеквадратичное отклонение, т.н. ОСКО), изменяющаяся в процессе ресурса с (10–20)% в начале ресурса до (60–80)% в конце ресурса;

- нестабильность потока нейтронов в процессе ресурса (т.н. долговременная нестабильность) — поток нелинейно уменьшается в несколько раз относительно начального значения;

- циклическая нестабильность нейтронного потока, проявляющаяся в том, что в начале каждого последующего длительного (несколько часов) рабочего цикла значение потока нейтронов в несколько раз ниже установившегося значения в цикле.

Первые два вида нестабильности известны со времени разработки первых ВНТ и кратко описаны, например, в [1]. Они обусловлены объективными особенностями физических процессов, протекающих в ВНТ, а именно, стохастическим характером искро-дугового разряда источника ионов (ИИ) [2, 3] и выработкой трития в мишени для ВНТ, в которых используется D-T реакция.

Анализ процессов в мишени ВНТ, приводящих к изменению концентрации трития в мишени ВНТ [4], и численные оценки, сделанные на основе известных характерных параметров нейтронных

Битулев Алексей Алексеевич, начальник группы.

Румянцев Георгий Сергеевич, инженер 1 категории.

Чуринов Сергей Владимирович, ведущий инженер.

Щитов Николай Николаевич, зам. начальника НИО

ФГУП ВНИИА им. Н.Л. Духова.

Россия, 127055, Москва, Сушевская ул., 22.

Тел.: (495) 321–49–88. E-mail: bogolubov@vniia.ru

Статья поступила в редакцию 15 мая 2014 г.

© Битулев А.А., Румянцев Г.С., Чуринов С.В., Щитов Н.Н., 2014

трубок, позволяют считать концентрацию трития, примерно, постоянной на временных отрезках менее часа. Тем самым, к первому виду неустойчивости процессы в мишени не имеют отношения.

Долговременная неустойчивость и ресурс тесно связаны: падение выхода или потока нейтронов в определенное число раз является критерием предельного состояния, определяющим

ресурс. Другими словами, при сохранении работоспособности трубки ресурс может определяться временем наработки, по истечении которого поток уменьшится, например, в 2 раза (по аналогии с периодом полураспада радиоизотопных источников). Для данного вида неустойчивости процессы в мишени уже играют важную, если не определяющую, роль. Согласно упрощенным

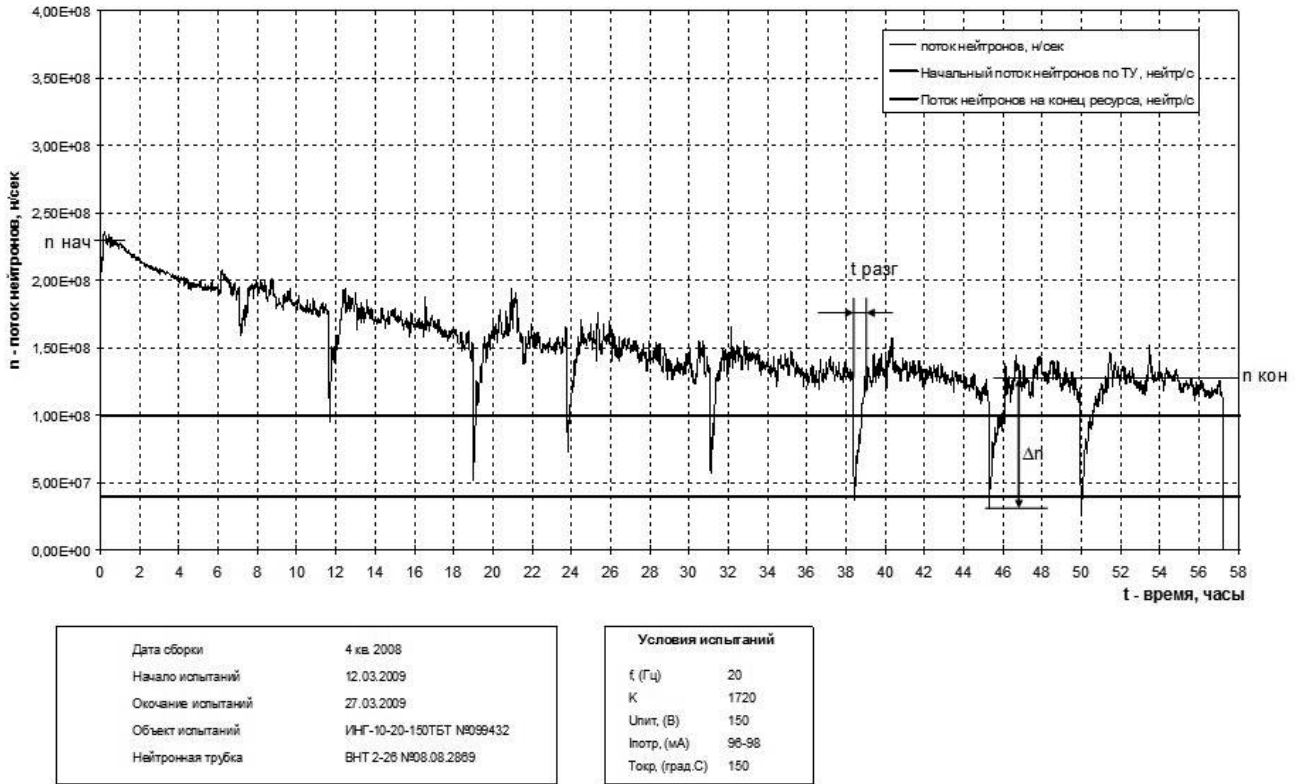


Рис. 1. Нейтронный поток ИНГ при ресурсных испытаниях.

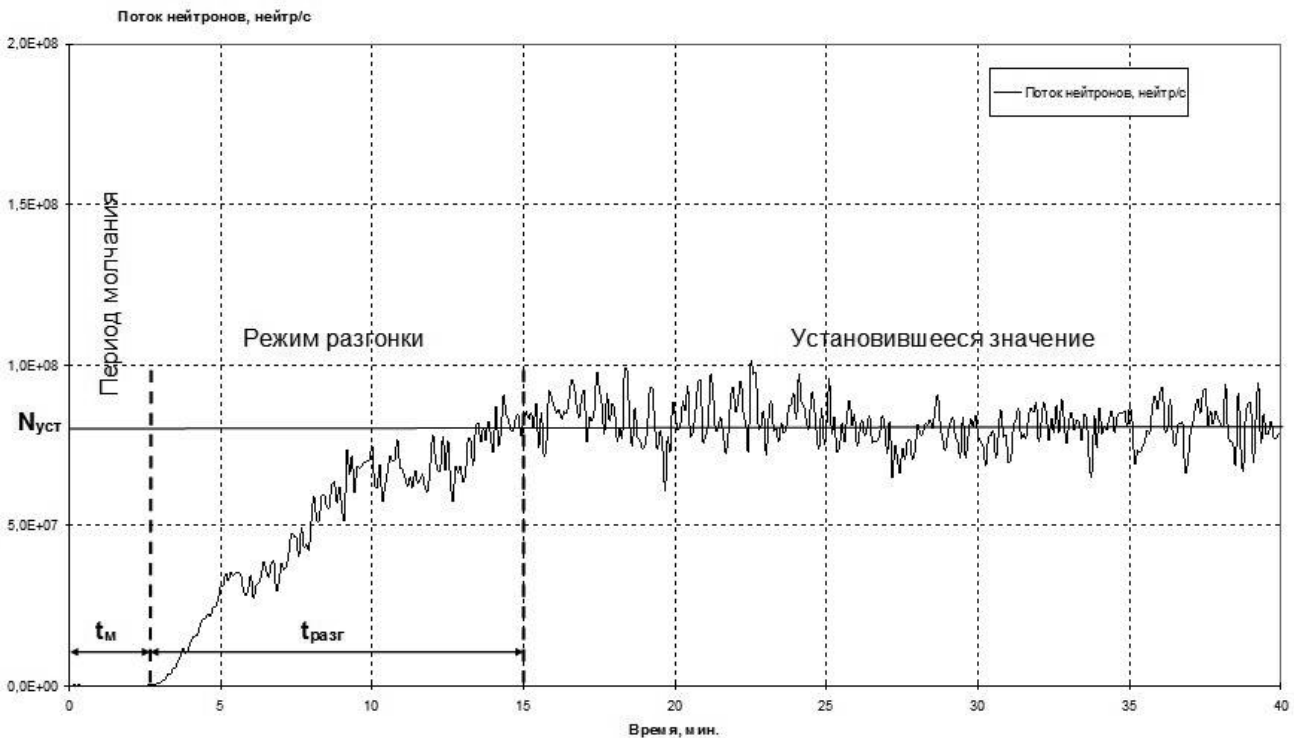


Рис. 2. Нейтронный поток ИНГ после длительного хранения (более 3-х лет).

оценкам в [5], наиболее значимыми являются процессы замещения трития дейтерием в мишени и термодесорбции трития с поверхности активного слоя. При этом второй процесс в большей мере ответственен за нелинейный спад потока на начальном этапе [6], а первый — за квазилинейный спад на большей части срока службы. Так, характерное время уравнивания концентраций трития и дейтерия в мишени каротажной ВНТ при потоке  $10^8$  нейтр/с имеет величину порядка 150–200 часов, что соответствует ресурсу самого ИНГ (при  $T_{\text{окр}} \approx 120$  °С). Это значение следует считать предельным для каротажных ВНТ с характерным диаметром мишени порядка 20 мм и энергией дейтронов порядка 100 кэВ в случае определения ресурса по критерию предельного состояния. В случае ВНТ, в которых используется D-D реакция, уменьшение потока нейтронов по мере наработки ресурса, в основном, определяется источником ионов.

Третий вид нестабильности, так же, как и временная эволюция ОСКО выхода (первого вида нестабильности), по мере наработки ресурса фактически не описан и не имел до настоящего времени адекватного объяснения. В настоящей работе на основе накопленного экспериментального материала сделана попытка такого объяснения и кратко рассмотрены возможности минимизации подобной нестабильности.

Приведем график нейтронного потока при ресурсных испытаниях (см. рис. 1). Генератор включался при нормальных климатических условиях ( $T_{\text{окр}} \approx 25$  °С), температура окружающей среды постепенно увеличивалась до 150 °С. Видно, что после каждого цикла и перерыва в работе требуется некоторое «время разгонки» для выхода на режим, соответствующий по значению потока предыдущему циклу. Причем это время  $t_{\text{разг}}$  так же как и «глубина провала» начального потока  $\Delta I$  возрастает по мере наработки ресурса. Более того, при условии длительного перерыва появляется т.н. «время молчания», в течение которого поток равен нулю (рис. 2).

### Интерпретация эксперимента

Представленные диаграммы, очевидно, корреспондируют с описанием из [7] поведения вакуумно-дугового разряда на длинном циркониевом катоде. Авторы выделяют три режима работы: очистка поверхности от загрязнений (оксидных пленок и диэлектрических включений), разогрев и рабочий. В режиме очистки на загрязненных участках рабочей поверхности катода возникает самостоятельный, хаотично и быстро перемещающийся разряд, охватывающий всю поверхность и способный существовать при более низком зна-

чении разрядного тока, чем минимально критический для основного разряда с материала катода. После удаления поверхностных загрязнений для разряда, существующего в парах материала катода, необходимо увеличение тока, как минимум, до критического значения. Увеличение тока выше этого значения приводит к сокращению времени разогрева и установлению основного дугового разряда с материала катода. Выбранные режимы работы: режим очистки — ток разряда 80 А, режим разогрева — 300 А и режим напыления — 200 А.

Однако «в чистом виде» подобная интерпретация не годится для ВНТ, представляющей собой отпаянный вакуумный прибор в отличие от описанного катода, работающего в непрерывно откачиваемой вакуумной камере, периодически соединяющейся с атмосферой. Корректная интерпретация поведения ВНТ и определение роли тех или иных процессов облегчается при учете эволюции электрических параметров, характеризующих работу трубки. На рис. 3 приведены осциллограммы ускоряющего напряжения и нейтронного импульса трубки ВНТ 2–26, длительное время не бывшей в эксплуатации после циклической работы. При включении ее в штатной биполярной схеме в режиме холостого хода (рис. 3, а) ускоряющее напряжение было штатным  $\sim 108$  кВ. Другими словами, остаточное давление в трубке так же было штатным, т.е. формально соответствовало требованиям электропрочности и генерации нейтронов. Однако в рабочем режиме, т.е. при включении ИИ, выход нейтронов отсутствовал, а ускоряющее напряжение практически равнялось нулю. Лишь после 300 срабатываний оно поднялось до 50 кВ (рис. 3, б), после 1200 срабатываний — до  $\sim 80$  кВ и появился нейтронный выход (рис. 3, в), и только после 4200 срабатываний (7 минут работы на частоте 10 Гц) — *разгонка трубки*, генератор вышел на штатный уровень ускоряющего напряжения 90 кВ и штатный нейтронный выход  $1 \cdot 10^7$  нейтр/имп (рис. 3, г).

Описанная эволюция ускоряющего напряжения и нейтронного выхода не соответствует процессу постепенного понижения давления при откачке работающим ИИ. В самом деле, изменение выхода нейтронов при изменении амплитуды импульса ускоряющего напряжения от 80 до 90 кВ (рис. 3, в, г) могло составить лишь порядка 40%, но никак не более порядка. Расчеты нейтронного выхода на 1 мА тока дейтронов по методике, изложенной в [8], дают приблизительно  $3 \cdot 10^{10}$  нейтр/мА·с и  $4 \cdot 10^{10}$  нейтр/мА·с для этих напряжений. (Эти расчетные данные очень хорошо соответствуют результатам, приведенным в отчете МАГАТЭ за 2012 г. [9].) С другой стороны, для того, чтобы ИИ мог работать как геттерный насос, необходим дуговой разряд, а не объемный тлеющий.

В таком случае остаточное давление в объеме трубки должно быть не выше  $10^{-3}$  мм рт. ст. При таком давлении в объеме трубки находится не более  $10^{13}$  молекул различных газов, считая внутренний объем ВНТ менее  $10 \text{ см}^3$ . Расчет количества атомов циркония, испаряемых за 1 импульс (снова по методике [8]), дает  $2,5 \cdot 10^{13}$  атомов. Тогда, если считать, что весь избыточный газ — это изотоп водорода, и коэффициент прилипания к пленке геттера не превышает 0,05 [10], то весь этот газ был бы адсорбирован за 10–20 импульсов, но никак не за 4000. Эта оценка справедлива, впрочем, если скорость сорбции определяется распыляемой пленкой. Если же она, напротив, определяется давлением остаточного газа, то уменьшение давления на 2 порядка произойдет за примерно 90 импульсов, что легко может быть определено из уравнения  $0,95^x = 0,01 \rightarrow x = 2 / (1 - \lg(0,95)) = 89,78$ . (Оценки скорости сорбции в соответствии с методикой раздела 1.3 [10] дают сходные цифры).

Осциллограммы рис. 3 могут быть объяснены тем, что при включении ИИ генерируется так много ионов, что импульсный трансформатор «подсаживается», т.е. ускоряющий импульс практически равен нулю. После 300 включений ионный поток, очевидно, существенно уменьшается, так что ускоряющий импульс уже равен 50 кВ, одна-

ко нейтронов все еще нет. Но и после 1200 включений, когда ускоряющий импульс почти равняется «рабочему», нейтронный импульс все еще непропорционально мал. Это может быть следствием того, что в потоке ионов еще нет дейтронов, зато присутствуют другие ионы. Причем эти ионы образуются лишь вблизи катодного пятна, т.е. изначально нейтральные атомы принадлежали электродам ИИ. В подтверждение последнего утверждения заметим, что на этом этапе разгонки максимум нейтронного импульса наблюдается позже максимума ускоряющего (рис. 3, в), тогда как после завершения разгонки максимумы совпадают (рис. 3, г).

По мере наработки ресурса поверхность поджигающей системы, с которой собственно и эмитируются ионы рабочего газа, покрывается пленкой распыленного материала анода (см. рис. 4). Эта рыхлая пленка сорбирует не только дейтерий, но и все другие газы, имеющиеся в остаточной атмосфере, т.е. кислород, азот и т.д. (Кислород, в частности, появляется при разрушении керамики в ходе вспомогательного разряда по ее поверхности). Поэтому вначале, после включения источника ионов, напыленная пленка освобождается от остаточных газов, частично распыляется, и только после этого источник начинает производить ионы рабочего газа. Рыхлая напыленная

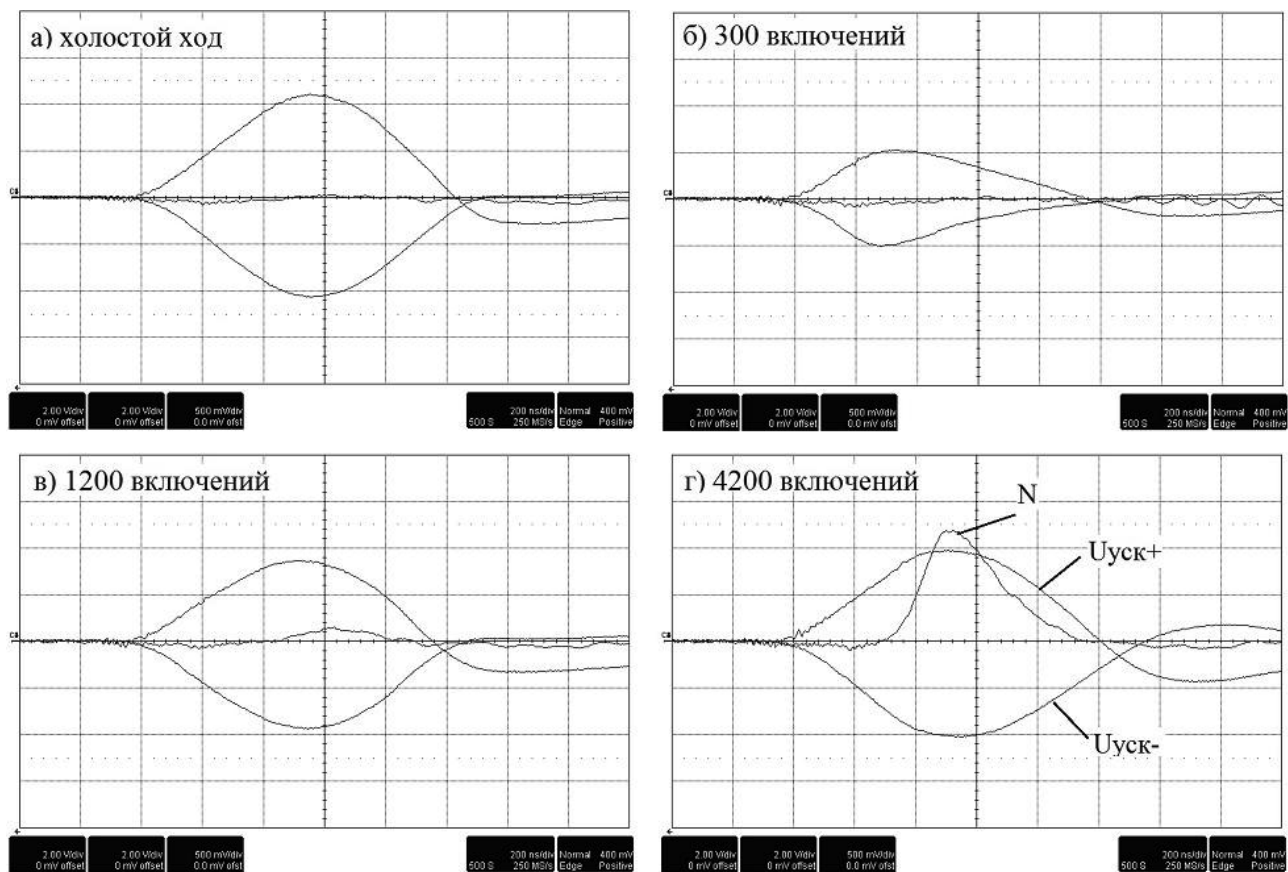


Рис. 3. Форма  $U_{\text{уск}}$  и нейтронного импульса при разгонке трубки.

пленка легко отдает газ при возникновении разряда и достаточно легко может быть обезгажена при прогреве.

В подтверждение этого на рис. 5 представлен второй вариант ресурсных испытаний ИНГ: перед включением генератор прогревался в течение двух часов до температуры окружающей среды  $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Как видно, в первом случае (рис. 1) в начале существует время разгонки нейтронного потока, которое увеличивается с 10–30 минут в начале ресурсных испытаний до 2 часов в конце испытаний. А прогретый генератор до температу-

ры окружающей среды  $+150\text{ }^{\circ}\text{C}$  выходит на установившийся уровень в течение  $\sim 10$  минут в ходе ресурсных испытаний.

Кстати, негативная роль этой пленки проявляется и в увеличении импульсной нестабильности по мере наработки ресурса. Поверхность электродов, закрытая пленкой, содержит теперь не только дейтерий, но и другие газы, распределенные крайне неравномерно. В качестве подтверждения предложенного объяснения приведем некоторые цитаты из [11, стр. 48, 59]: «... водород на деталях, извлеченных из водородной печи, так же бы-



Рис. 4. Распыленные плёнки на поверхности поджигающей системы ИИ.

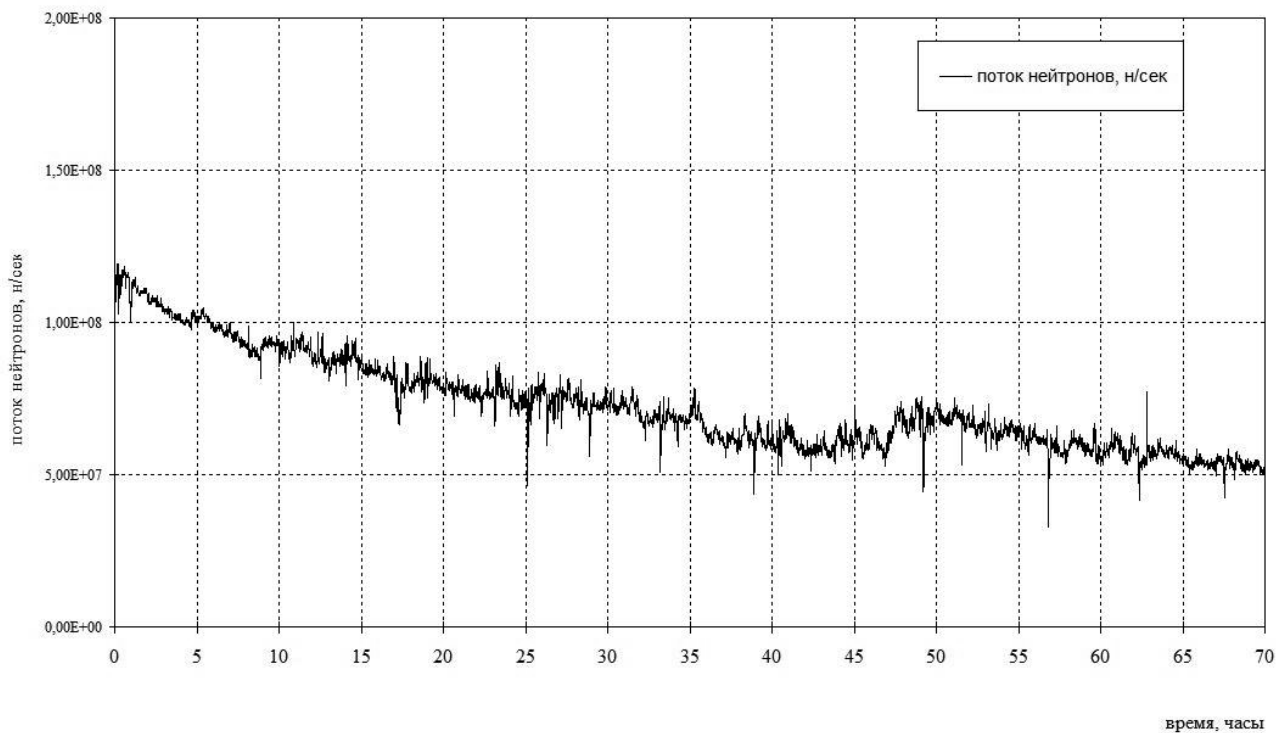


Рис. 5. Нейтронный поток предварительно прогретого до температуры окружающей среды  $150\text{ }^{\circ}\text{C}$  ИНГ при ресурсных испытаниях.

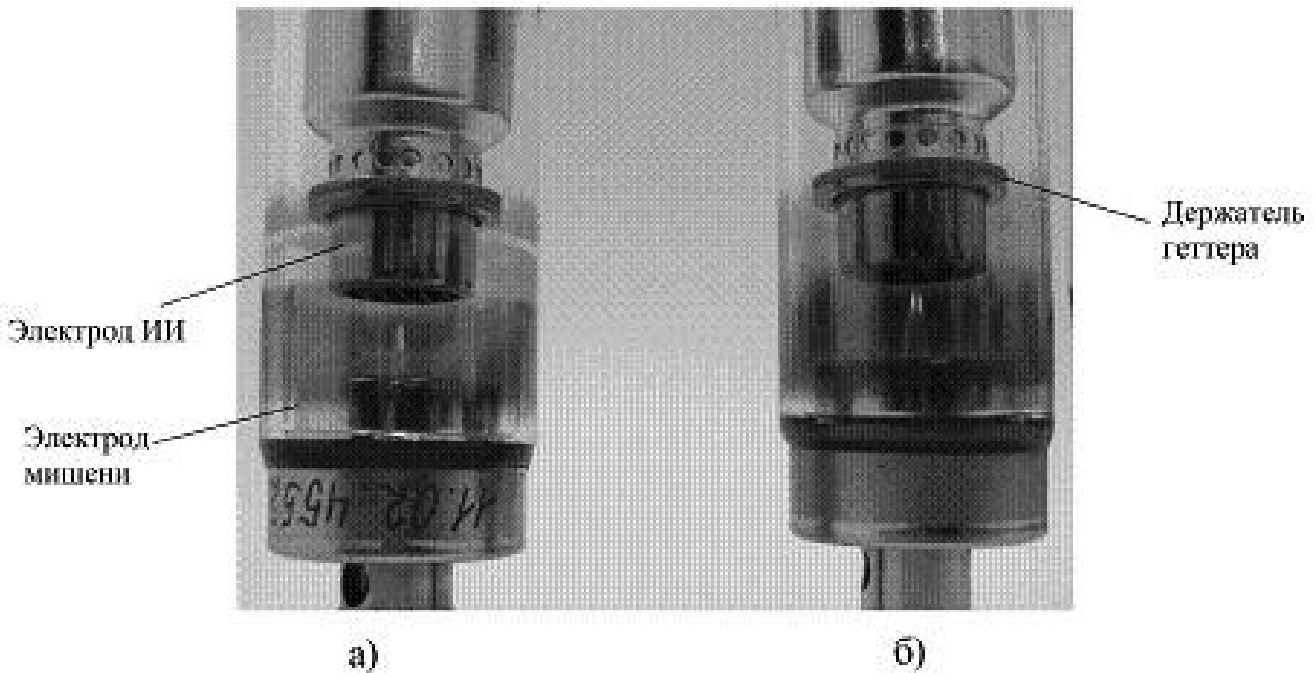


Рис. 6. Запыление нейтронных трубок ВНТ 4–26 (а) и ВНТ 2–26 (б) после ресурсных испытаний при повышенной температуре окружающей среды в составе БТ.

стро замещается на воздухе азотом и кислородом, имеющими более высокие энергии адсорбции, чем водород; ... на большинстве металлов окись углерода, азот и кислород сорбируются сильнее водорода. Пары воды и углеводороды в ряде случаев задерживают последующую сорбцию других газов». И еще (стр. 49): «Зато при бомбардировке поверхностей заряженными частицами (ионами и электронами) энергия, передаваемая адсорбированным молекулам, всегда намного превосходит величину энергии связи. Это обстоятельство требует исключить в работающих электровакуумных приборах бомбардировку геттерных пленок заряженными частицами, т.к. в противном случае ранее сорбированный ими газ может интенсивно выделяться». Очевидно, существующая конструкция ИИ не соответствует данному требованию в полной мере.

#### Подтверждение интерпретации. Пути повышения стабильности

Итак, предложенное объяснение, очевидно, предполагает следующие пути повышения импульсной и циклической стабильности:

- желательно исключить инициацию основного разряда ИИ ВНТ на поверхности геттерной пленки, осаждающейся на поджигающей системе ИИ;
- необходимо изменить температурный режим ИИ таким образом, чтобы газы остаточной атмосферы сорбировались преимущественно пленками, осажденными вне поджигающей системы ИИ;
- желательна замена материала изолятора — например, оксидов на карбиды (карбид кремния);

- финишная термовакuumная обработка ВНТ должна производиться при более высоких температурах, а также в присутствии плазмы инертного газа для удаления растворенных в деталях ВНТ газов.

Если говорить о долговременной стабильности и, соответственно, ресурсе, то по аналогии с процедурой *разгонки катода*, предложенной в [7], можно было бы изменять параметры схемы питания, что в случае ИНГ легче всего осуществлять с помощью изменения анодного напряжения. Если для катода вакуумно-дугового испарителя определяющим является ток в силу постоянства потенциала горения дуги, то можно сказать, что мощность в трех предложенных режимах изменялась в отношении 0,4:1,5:1. В таком случае энергии, потребляемую ИИ ВНТ за импульс, надо было бы изменять в том же соотношении, т.е. анодное напряжение, в рабочем режиме составляющее 3,5 кВ, в режиме очистки должно быть  $U_{оч} = 3,5 \cdot (0,4)^{1/2} = 2,2$  кВ, а в режиме прогрева  $U_{пр} = 3,5 \cdot (1,5)^{1/2} = 4,3$  кВ.

Реализация этих пожеланий сопряжена с разной степенью сложности. Первое предполагает радикальное изменение конструкции ИИ, сопряженное с риском «жестчения» поджига, т.е. увеличения необходимой амплитуды поджигающего импульса. (Наличие рыхлой пленки на поверхности изолятора облегчает развитие вспомогательного разряда.) Реализация третьего зависит от наличия технологии изготовления изоляторов из альтернативных материалов. Последнее предложение, предполагающее изменение параметров

схемы питания ИИ, может быть проще всего реализовано заданием временных промежутков, соответствующих первым двум режимам. Однако точное определение момента завершения каждого из этих режимов в случае ИНГ, особенно в условиях меняющейся температуры окружающей среды, требует постоянного мониторинга тока основного разряда, т.е. значительного усложнения схемы.

В настоящее время второе предложение реализовано в конструкции новой трубки ВНТ 4–26, что позволило существенно увеличить ресурс и стабильность работы БТ при высоких температурах, а также радикально уменьшить запыление внутренней поверхности баллона, что так же способствует увеличению ресурса.

На рис. 6 представлены трубки ВНТ 4–26 (а) и ВНТ 2–26 (б), проработавшие в составе ИНГ при температуре окружающей среды +150 °С. У трубки ВНТ 4–26 запыление внутренней поверхности баллона существенно меньше, чем у трубки ВНТ 2–26. Из графиков зависимости импульсной стабильности от времени наработки для трубок ВНТ 2–26 и ВНТ 4–26 (рис. 7) видно, что стабильность ВНТ 4–26 при работе генератора при повышенной температуре существенно выше, чем у нейтронной трубки ВНТ 2–26. Полученные при испытаниях генераторов нейтронов при рабочей температуре 175 °С результаты дают основание утверждать, что изменения в нейтронной трубке ВНТ 4–26 по сравнению с ВНТ 2–26 позволили и существенно увеличить ресурс БТ и при температуре окружающей среды до 175 °С.

## Заключение

На основании анализа литературных данных и результатов различных испытаний ИНГ предложено объяснение циклической нестабильности их работы. Данное объяснение косвенно было подтверждено при ресурсных испытаниях предварительно прогретого ИНГ. Реализация предложения по изменению конструкции ВНТ, основанного на предложенной интерпретации, позволило существенно улучшить как импульсную, так и циклическую стабильность. Долговременная стабильность и ресурс также значительно возросли.

## Литература

1. *Кирьянов Г.И.* Генераторы быстрых нейтронов. — М.: Энергоатомиздат. 1990.
2. *Anders A., Hollinger R.* // Rev. Sci. Instrum. 2002. V.73, No. 2, P. 732
3. *Oks E., Yushkov G., Litovko I., et al.* // Rev. Sci. Instrum. 2002. V.73. No. 2. P. 735
4. *Применко Г.И., Стрижак В.И., Чикаи И. и др.* // Известия вузов. Физика. 1988. № 5
5. *Румянцев Г.С., Щитов Н.Н.* Повышение ресурса и стабильности работы вакуумной нейтронной трубки / Материалы XX-й Научно-технической конференции с участием зарубежных специалистов «Вакуумная наука и техника», М., МИЭМ, 2013.
6. *Румянцев Г.С., Щитов Н.Н.* Исследование возможности повышения долговременной стабильности нейтронного потока вакуумной нейтронной трубки / Материалы XIX-й Научно-тех-

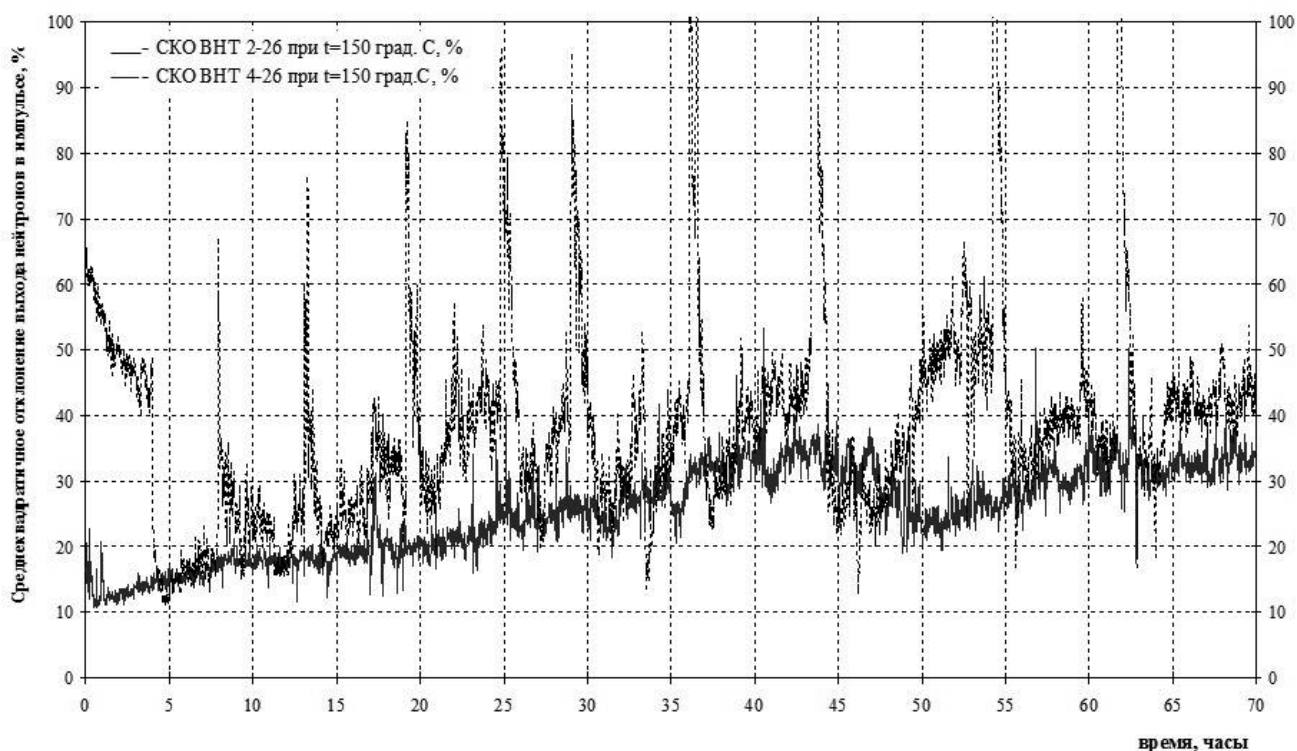


Рис. 7. ОСКО выхода нейтронов в импульсе нейтронных трубок ВНТ 2–26 и ВНТ 4–26.

нической конференции с участием зарубежных специалистов «Вакуумная наука и техника», М., МИЭМ, 2012.

7. Быстров Ю.А., Ветров Н.З., Лисенков А.А. // Вакуумная техника и технология. 2012. Т. 22. № 3. С. 133

8. Румянцев Г.С., Щитов Н.Н., Узволок А.А. Математическое моделирование процессов в вакуумной нейтронной трубке / Материалы XVIII-й Научно-технической конференции с участием за-

рубежных специалистов «Вакуумная наука и техника», М., МИЭМ, 2011.

9. Neutron Generators for Analytical Purposes // IAEA Radiation Technology Reports. Vienna. 2012. No. 1

10. Саксаганский Г.Л. Электрофизические вакуумные насосы. — М.: Энергоатомиздат, 1988

11. Черепнин Н.В. Вакуумные свойства материалов для электронных приборов, — М.: Советское радио, 1966

## The problem of stability of neutron generators using vacuum neutron tubes

A. A. Bitulev, G. S. Romyantsev, S. V. Churinov, and N. N. Shchitov

All-Russia Research Institute of Automatics (VNIIA)

22 Sushchevskaya str., Moscow, 127055, Russia

E-mail: bogolubov@vniia.ru

Received May 15, 2014

***The improvement of the logging pulsed neutron generator's key performance metrics is essentially limited by the sealed neutron tube itself. This article is deduced to the problem of the neutron flux high instability due to the tube inner processes and its possible solutions.***

PACS: 52.50.Dg, 52.70.Nc, 52.80.Vp

*Keywords:* pulsed neutron generators, sealed neutron tubes, ion source, pulse-, cyclic-, long-term stability.

### References

1. G. I. Kir'yanov, *Generators of Fast Neutrons* (Energoatomizdat, Moscow, 1990) [in Russian].

2. A. Anders, R. Hollinger. *Rev. Sci. Instrum.* **73**, 732 (2002).

3. E. Oks, G. Yushkov, I. Litovko, et al., *Rev. Sci. Instrum.* **73**, 735 (2002).

4. G. I. Primenko, V. I. Strizhak, I. Chikai, et al., *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved., Fizika*, No. 5, (1988).

5. G. S. Romyantsev and N. N. Shchitov, in *Proceedings of the XX Conference on Vacuum Science and Technology* (MIEM, Moscow, 2013) [in Russian].

6. G. S. Romyantsev and N. N. Shchitov, in *Proceedings of the XX Conference on Vacuum Science and Technology* (MIEM, Moscow, 2012) [in Russian].

7. Yu. A. Bystrov, N. E. Vetrov, and A. A. Lisenkov, *Vakuumnaya Tekhnika i Tekhnologiya*, **22** (3), 133 (2012).

8. G. S. Romyantsev, N. N. Shchitov, and Uzvolok, in *Proceedings of the XX Conference on Vacuum Science and Technology* (MIEM, Moscow, 2011) [in Russian].

9. *Neutron Generators for Analytical Purposes* (IAEA Radiation Technology Reports, No. 1, Vienna, 2012).

10. G. L. Saksagansky, *Electrophysical Vacuum Pumps* (Energoatomizdat, Moscow, 1988) [in Russian].

11. N. V. Cherepnin, *Vacuum Features of Materials* (Sovetskoe Radio, Moscow, 1966) [in Russian].