

6  
А-30

АКАДЕМИЯ НАУК КИРГИЗСКОЙ ССР  
ОТДЕЛЕНИЕ ЕСТЕСТВЕННЫХ И ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК

---

Л. П. БАЙВЕЛЬ

ПРИМЕНЕНИЕ БЕТА-ИЗЛУЧЕНИЯ  
ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ  
И АВТОМАТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ  
ВЛАЖНОСТИ ПАРА  
В ПАРОВОЙ ТУРБИНЕ

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Фрунзе 1964



АКАДЕМИЯ НАУК КИРГИЗСКОЙ ССР  
ОТДЕЛЕНИЕ ЕСТЕСТВЕННЫХ И ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК

---

Л. П. БАЙВЕЛЬ

ПРИМЕНЕНИЕ БЕТА-ИЗЛУЧЕНИЯ  
ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ  
И АВТОМАТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ  
ВЛАЖНОСТИ ПАРА  
В ПАРОВОЙ ТУРБИНЕ

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель —  
академик АН Казахской ССР,  
профессор, доктор физико-математи-  
ческих наук М. И. КОРСУНСКИЙ.

Фрунзе 1964



А 30

АКАДЕМИЯ НАУК КИРГИЗСКОЙ ССР

Объединенный Ученый Совет отделения естественных и технических наук,  
г. Фрунзе, ул. Пушкина, 78.

№ \_\_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 1964 г.

Объединенный Ученый Совет отделения естественных и технических наук Академии наук Киргизской ССР направляет Вам для ознакомления автореферат диссертационной работы тов. БАЙВЕЛЯ Л. П. на тему «Применение бета-излучения для измерения и автоматического контроля влажности пара в паровой турбине», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук.

Защита диссертации намечается на \_\_\_\_\_ 1964 г.

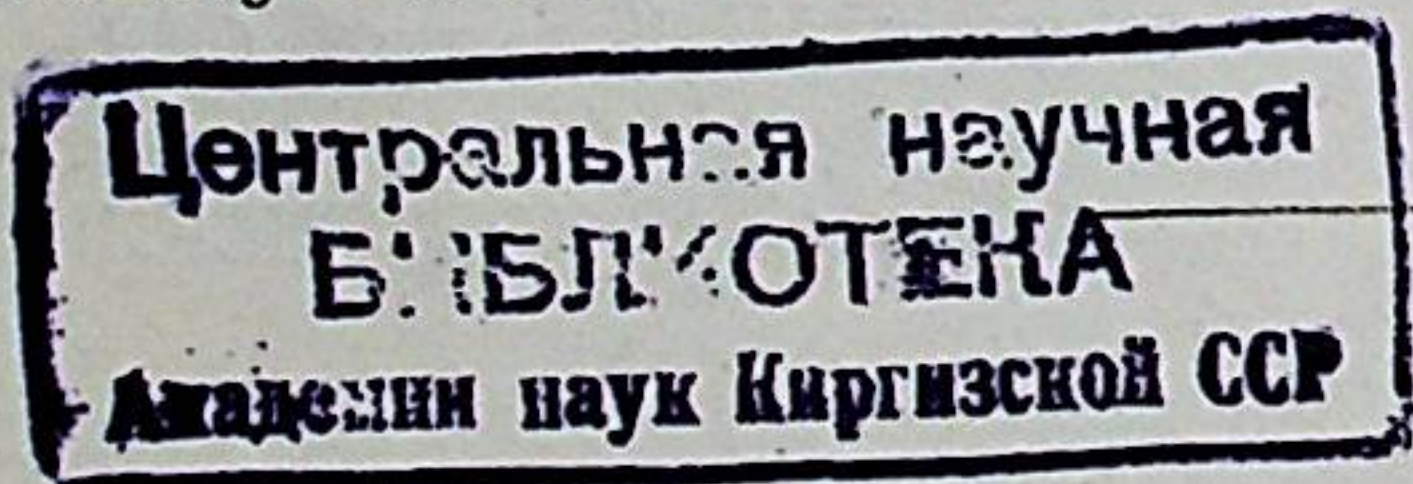
О дне и времени защиты будет объявлено за 10 дней до защиты в газетах «Советская Киргизия» и «Советтик Кыргызстан».

Ваши замечания по автореферату просьба направлять по адресу: гор. Фрунзе, ул. Пушкина, 78.

Ученый секретарь Объединенного  
Ученого Совета

М. КЫДЫНОВ.

Диссертация выполнена в Харьковском политехническом институте имени В. И. Ленина.



328963

Ответственный за выпуск — доц. В. А. Базакуца.

Сдано в набор 6/X-64 г. Подписано к печати 22/X-64 г.  
БЦ 21191. Объем 1 ф. л. и 1 усл. п. л. Формат 60×90<sup>1</sup>/<sub>16</sub>.  
Заказ А-206. Тираж 200.

Харьковская книжная типография «Коммунист»  
Государственного Комитета Совета Министров Украинской ССР по печати.  
Харьков, Пушкинская, 29.

Программой Коммунистической партии Советского Союза, принятой на XXII съезде КПСС, предусмотрено довести выработку электроэнергии к 1970 году до 900—1000 миллиардов киловатт-часов и к 1980 году — до 2700—3000 миллиардов киловатт-часов, что позволит полностью завершить электрификацию всей страны.

Основой наращивания энергетических мощностей страны является строительство мощных тепловых электростанций, на которых производится более 80% общей выработки электроэнергии. К 1980 году предстоит построить сотни районных тепловых электростанций. Мощность атомных электростанций, вводимых в строй в 1959—1965 гг., составит 2,5 миллиона киловатт.

Техническая база современной энергетики — это прежде всего паровые турбины, которые еще длительное время будут являться практически единственными двигателями тепловых электростанций. Для выполнения программы полной электрификации страны энергомашиностроительным заводам предстоит в несколько раз увеличить производство паровых турбин.

Главными направлениями технического развития паротурбостроения являются: создание турбоагрегатов большой мощности и всемерное повышение экономичности турбоустановок. Важнейшей задачей конструкторов паровых турбин является проектирование ступеней паровой турбины с задачей обеспечения их максимального к. п. д.

В современных мощных паровых турбинах значительная часть мощности вырабатывается в цилиндрах низкого давления. При этом к. п. д. ступеней низкого давления оказывается намного ниже к. п. д. ступеней высокого давления. Одной из причин низкой эффективности этих ступеней является то, что они работают в области влажного пара. Увеличение степени влажности пара на 1% уменьшает коэффициент полезного действия турбинной ступени не менее, чем на 1%. Влажный пар вызывает эрозию лопаток турбины, что снижает срок службы лопаток и может быть причиной аварии турбины.

В турбинах насыщенного пара атомных электростанций в области влажного пара оказываются и ступени высокого



давления. При достижении предельно допустимых значений влажности (12—14%) пар выводится из турбин в сепараторы, где отделяется от влаги.

Повышение экономичности и обеспечение безопасности работы мощных паровых турбин в значительной степени зависит от решения проблем, связанных с течением влажного пара. Для правильного подхода к проектированию турбинных ступеней необходимо знание картины распределения влажности в потоке пара. Знание распределения влажности по высоте лопатки турбины необходимо для создания совершенных конструкций влагоулавливающих устройств.

При нарушении работы сепараторов влаги влажность пара может возрасти до недопустимой величины, в связи с чем необходим постоянный контроль за величиной влажности пара.

Вопросы, связанные с работой ступеней паровой турбины в области влажного пара, сравнительно мало изучены. При проектировании ступеней нет надежных данных для профилирования проточной части, для определения расходных и аэродинамических характеристик. Поэтому в настоящее время на всех крупных турбинных заводах и в ряде научно-исследовательских организаций ведутся интенсивные исследования работы паровых турбин в области влажного пара. Одной из главных задач при этих исследованиях является организация измерения степени влажности за последней ступенью турбины, где влажность пара достигает максимальной величины. Измерение степени влажности пара в различных сечениях по высоте рабочей лопатки необходимо для решения следующих важных задач: исследования влияния степени влажности пара на к. п. д. турбины; исследования течения влаги в турбине; исследования влияния влажности на аэродинамические характеристики потока; исследования влияния различных конструктивных элементов турбинной ступени на распределение влажности в потоке пара.

Из вышеизложенного ясна необходимость в наличии устройств для измерения и контроля влажности пара. В связи с этим рядом организаций в СССР и зарубежных странах ведутся исследования по разработке методики и приборов для измерения влажности пара в турбине. Однако, ввиду больших трудностей, возникающих при создании таких приборов, в настоящее время измерение влажности пара в турбине почти не производится. В тех немногих случаях, когда проводились подобные измерения, они выполнялись не непосредственно в потоке, а путем отбора пробы пара из турбины.

Настоящая работа посвящена решению задачи непрерывного измерения и автоматического контроля влажности пара в паровой турбине.

В первой главе диссертации рассмотрены имеющиеся методы и устройства для измерения влажности пара.

Все существующие методы для измерения влажности пара можно разбить на два класса в зависимости от того, осуществляется ли измерение влажности в потоке пара или в отобранной из потока пробе. Измерения, выполняемые с помощью заборника пробы, связаны с целым рядом трудностей. При этих измерениях необходимо обеспечить изокINETический отбор, т. е. равенство скорости в устье пробоотборника и скорости потока. Отбор пробы может нарушить естественную структуру пара и его состояние. Существенным источником погрешностей является несовпадение направлений движения потока пара в турбине и влаги, содержащейся в паре. При ориентировке заборника по направлению потока пара проба содержит меньшее относительное количество влаги, чем основной поток.

Относительная погрешность при измерении степени влажности, возникающая при ориентировке заборника по направлению потока пара, равна:

$$\delta y = (1 - y) \cos \alpha, \quad (1)$$

где  $y$  — степень влажности пара;  $\alpha$  — угол между направлениями скоростей пара и влаги.

Даже при идеальной измерительной схеме, не вносящей никаких погрешностей, измерения, связанные с отбором пробы, производятся с ошибкой, величину которой невозможно оценить, так как пока нет методов для определения величины угла  $\alpha$ . Измерения, проводящиеся непосредственно в потоке, свободны от этого недостатка.

В этой же главе уточняются определения модификаций степени влажности: истинной, расходной и диаграммной.

Проведена систематизация имеющихся методов и устройств для измерения влажности пара по признаку измеряемой ими модификации степени влажности и их анализ с точки зрения возможности использования для непрерывного измерения и автоматического контроля. На основе выполненного анализа показано, что имеющиеся методы измерения влажности пара в турбине не дают возможности осуществления на их основе автоматического контроля.

Опыт использования гамма-излучения для просвечивания пароводяной смеси, нашедшего широкое применение для исследования внутрикотловых процессов, показывает, что при-



менение излучения радиоактивных изотопов для исследования пароводяной смеси является наиболее перспективным, так как оно дает возможность измерения параметров этой смеси непосредственно в потоке, независимо от размеров капель влаги в потоке пара. Исходя из вышеизложенного, в основу исследований по разработке метода и устройства для измерения влажности пара в паровой турбине было положено применение ядерных излучений.

Во второй главе описан предложенный метод измерения влажности пара по поглощению бета-излучения. Источник и приемник излучения размещаются по разные стороны парового потока. Интенсивность излучения, прошедшего поток пара, является функцией степени влажности последнего. Истинная влажность пара  $y_{и}$  находится путем определения его плотности  $\rho$ :

$$y_{и} = \frac{\rho - \rho''}{\rho}, \quad (2)$$

где  $\rho''$  — плотность сухого насыщенного пара, определяемая из термодинамических таблиц.

Плотность влажного пара  $\rho$  находится путем сравнения значений интенсивности бета-излучения после прохождения излучением потока перегретого пара и потока влажного пара:

$$\rho = \frac{1}{\mu_{м}d} \ln \frac{I_{пп}}{I} + \rho_{пп}, \quad (3)$$

где  $I_{пп}$  — интенсивность излучения после прохождения потока перегретого пара;  $I$  — интенсивность излучения после прохождения потока влажного пара;  $\rho_{пп}$  — плотность перегретого пара, найденная из термодинамических таблиц по измеренным давлению и температуре;  $\mu_{м}$  — массовый коэффициент поглощения бета-излучения;  $d$  — расстояние между источником и приемником излучения.

При определении влажности пара на последних ступенях турбины необходимо использовать бета-излучение, так как гамма-излучение непригодно из-за малой плотности среды.

Одним из затруднений, возникающих при определении степени влажности по поглощению бета-излучения, является возможность образования на поверхностях источника и приемника излучения пленок влаги. Наличие пленок влаги искажает результаты определения плотности влажного пара, так как в этом случае бета-излучение будет поглощаться не только паровой средой, но и пленками влаги на поверхностях источника и приемника излучения. Значение плотности, найденное из соотношения (3), окажется завышенным по сравнению с истинным.

Произведена оценка погрешности, допускаемой при определении плотности влажного пара без учета пленок. Разработана методика учета влияния пленок влаги, образующихся на поверхностях источника и приемника излучения, помещенных в поток пара. При наличии пленок истинная степень влажности находится путем определения полной поверхностной плотности поглотителя  $P$ , складывающейся из поверхностной плотности влаги (распределенной в потоке и выпавшей в виде пленки) и сухого насыщенного пара:

$$y_{и} = \frac{P - d\rho''}{\rho}. \quad (4)$$

Значение  $P$  находится сравнением интенсивности излучения  $I$  при прохождении потока влажного пара с значением интенсивности излучения  $I_{пп}$  при прохождении потока перегретого пара:

$$P = \frac{1}{\mu_{м}} \ln \frac{I_{пп}}{I} + \rho_{пп}d. \quad (5)$$

Для того, чтобы результатами измерения степени влажности можно было пользоваться при тепловых расчетах, необходимо знать, какому значению диаграммной степени влажности  $y_{д}$  соответствует полученное при измерении значение истинной степени влажности  $y_{и}$ . Для этого необходимо предусмотреть возможность установления связи между значениями  $y_{и}$ , определяемыми по поглощению бета-излучения, и значениями  $y_{д}$ , определяемыми иным путем. При этом требуется изучить, при каких условиях  $y_{и}$  и  $y_{д}$  будут однозначно связаны между собой, или, что то же самое, при каких условиях величина  $P$  будет являться однозначной функцией  $y_{д}$ . Для правильного выбора бета-излучателя необходимо определить значение  $P$  при различных параметрах пара. Все эти обстоятельства требуют создания специальной экспериментальной установки для изучения поглощения бета-излучения потоком влажного пара и для установления связи между  $y_{и}$  и  $y_{д}$ . В качестве такой установки был выбран контур влажного пара, в котором образование влажного пара производится путем смешения известных количеств перегретого пара и воды. В контуре влажного пара можно осуществить просвечивание потока пара бета-излучением и определить величину  $P$ , согласно соотношению (5).

Диаграммная степень влажности пара в контуре находится из соотношения:

$$y_{д} = 1 - \frac{1}{G_{вп}r} (G_{пп}i_{пп} + G_{в}i_{в} - G_{к}i' - G_{вп}i'), \quad (6)$$



где  $G_{вп}$ ,  $G_{пп}$ ,  $G_v$  и  $G_k$  — соответственно расход влажного пара, перегретого пара, воды и сконденсированного пара, не пошедшего на смешение;  $i_{пп}$ ,  $i_v$ ,  $i'$  — соответственно энтальпия перегретого пара, воды, идущей на смешение, и кипящей воды;  $r$  — удельная теплота парообразования.

Поверхностная плотность влажного пара может быть найдена расчетным путем из соотношения:

$$P_p = \frac{\rho'' d}{1 - y_d} \quad (7)$$

Для того, чтобы определить, от каких параметров пара зависит величина  $P$ , необходимо провести теоретическое и экспериментальное исследование течения влажного пара. Это исследование должно установить, при каких условиях  $P$  будет являться однозначной функцией  $y_d$ , при каких параметрах пара начнет сказываться влияние на измерения, производимые с помощью бета-излучения, пленки влаги, образующейся на источнике и приемнике излучения.

Предложен метод исследования течения влажного пара в трубопроводе путем сравнения параметров среды, определенных расчетным путем и путем просвечивания потока влажного пара бета-излучением. Сравняются поверхностная плотность влажного пара  $P_p$ , определенная расчетным путем, и поверхностная плотность влажного пара  $P$ , определенная по поглощению бета-излучения.

Рассмотрен ряд предельных случаев распределения влаги в трубопроводе, а затем общий случай течения влажного пара.

Показано, что по виду функции  $P_p = f(P)$  можно судить о характере течения влажного пара в трубопроводе. В частности, если при каких-то параметрах потока график функции  $P_p = f(P)$  представляет собой прямую, проходящую через начало координат под углом  $45^\circ$  к осям, то это означает, что при этих параметрах толщиной пленки на стенках трубопровода можно пренебречь. Если график функции  $P_p = f(P)$  отклоняется от прямой, то это означает, что пленка влаги имеет заметную толщину.

При анализе течения влажного пара действительное распределение скоростей в пленке на поверхности трубопровода заменяется разделением пленки на два слоя: один, движущийся со скоростью потока  $w$ , толщиной  $a_{эфф}$ ; другой — неподвижный, толщиной  $\delta$ . Общая толщина пленки  $a = a_{эфф} + \delta$ , средняя скорость течения пленки  $\bar{w}$ .

Показано, что толщина неподвижной пленки

$$\delta = a \left( 1 - \frac{\bar{w}}{w} \right) \quad (8)$$

Путем сравнения значений истинной и расходной степени влажности получено соотношение для определения отношения скоростей:

$$\frac{\bar{w}}{w} = \frac{P_p y_d}{P - d \rho''} \quad (9)$$

Можно предположить, что при значительной влажности  $\frac{\bar{w}}{w} \ll 1$ . При этом  $\delta \approx a$ .

Из сравнения значений  $P_p$  и  $P$  можно найти величину  $\delta$ :

$$\delta = \frac{1}{2 \rho' \rho''} \ln \frac{I_{пп}}{I} + \frac{\rho_{пп} d}{2 \rho'} - \frac{\rho'' d}{2 \rho' (1 - y_d)}, \quad (10)$$

где  $\rho'$  — плотность воды.

При указанном выше предположении величина  $\delta$  будет являться толщиной всей пленки, образующейся на поверхности трубопровода.

Таким образом, на основе выведенных соотношений можно осуществить исследование течения влажного пара и определить параметры, характеризующие это течение. Следует отметить, что описанная методика исследования течения двухфазной среды путем сравнения значений поверхностной плотности среды, определенных расчетным путем и по поглощению бета-излучения, может найти применение и в других областях техники.

В третьей главе изложены результаты экспериментального исследования течения влажного пара по поглощению бета-излучения. Описана конструкция экспериментальной установки (контура влажного пара), собранной на Харьковском турбинном заводе, для исследования течения влажного пара и определения параметров, характеризующих это течение. В установке образуется влажный пар путем впрыскивания в поток перегретого пара определенного количества воды. Измеряются параметры перегретого пара, впрыскиваемой воды и образовавшегося влажного пара. Диаграммная степень влажности находится из уравнения теплового баланса, согласно соотношению (6). Была предусмотрена возможность изменения в широких пределах давления, степени влажности и скорости течения пара.

В соосных отверстиях в стенках трубопровода, по которому течет влажный пар, установлены источник и приемник бета-



излучения. В качестве приемника излучения использовался газоразрядный счетчик типа СБТ-7, соединенный с радиометром. Во избежание выхода из строя при соприкосновении с паровой средой, счетчик был отделен от последней специальной диафрагмой, состоящей из двух спаянных стальных дисков с соосными небольшими отверстиями и тонкой алюминиевой фольги между дисками. Такая диафрагма пропускает бета-излучение с минимальным поглощением, не пропускает пар и имеет достаточную прочность при могущих иметь место температуре и давлении.

В данном случае, когда имеется необходимость помещения источника излучения в поток пара, невозможно использование стандартных источников бета-излучения, так как их прочность оказывается недостаточной. Поэтому был изготовлен специальный источник, конструкция которого обеспечивала достаточную прочность, герметичность и минимальное поглощение излучения в самом источнике. В качестве бета-излучателя был выбран радиоактивный изотоп таллия  $Tl^{204}$ .

В результате предварительных исследований было установлено, что поглощение бета-излучения таллия-204 паром даже при малых поверхностных плотностях последнего описывается экспоненциальным законом, и был определен массовый коэффициент поглощения бета-частиц в паре.

Дальнейшее исследование было проведено с целью установления факторов, от которых зависит величина полной поверхностной плотности влажного пара, и определения значений этой величины. Это потребовало проведения на основе теоретических соображений, изложенных во 2 главе, экспериментального изучения течения влажного пара при различных параметрах последнего.

Сложность проведения эксперимента заключалась в том, что необходимо было обеспечить в каждой серии опытов постоянство двух из трех параметров пара, могущих влиять на величину  $P$ : статического давления  $p$ , скорости пара  $w$  и диаграммной степени влажности  $u_d$ .

Измерялась интенсивность излучения после прохождения им потока перегретого пара известной плотности. На каждом режиме работы контура влажного пара измерялись значения температуры, давления и расхода перегретого пара, температуры и расхода воды, расхода и давления влажного пара, расхода сконденсировавшегося пара, не пошедшего на смешение, интенсивность бета-излучения. По этим данным находились значения  $w$ ,  $u_d$ ,  $P_p$ ,  $P$ ,  $\frac{\bar{w}}{w}$ ,  $\delta$ . Измерения были про-

ведены в интервале значений  $p = 5 \cdot 10^3 \div 1,5 \cdot 10^5 \frac{H}{M^2}$ ;  $w = 50 - 300 \text{ м/сек}$ ;  $u_d = 0 \div 50\%$ . Результаты исследований представлялись в виде графиков  $P_p = f(p)$ ;  $P = f(p)$ ;  $P = f(u_d)$ ;  $\delta = f(p)$ ;  $\delta = f(u_d)$ . Из рассмотрения графиков видно следующее. При малых значениях  $u_d$  (до 5%) график функции  $P_p = f(p)$  представляет прямую линию, идущую под углом  $45^\circ$  к осям. Это означает, что в этих пределах значений  $u_d$  толщина пленки на поверхности трубопровода пренебрежимо мала. При  $u_d > 5\%$  график функции  $P_p = f(p)$  отклоняется от прямой линии. Это означает, что толщина пленки имеет заметное значение.

Исследованиями установлено, что при указанных выше значениях скорости пара  $w$  ее изменение не влияет на значение  $P$ . Таким образом, величина  $P$  является однозначной функцией  $p$  и  $u_d$ . Определены значения  $P$  при различных значениях  $p$  и  $u_d$ . Определение величины  $\frac{\bar{w}}{w}$  показало, что при

$u_d > 7\%$  отношение  $\frac{\bar{w}}{w} \ll 1$ . Это означает, что величину  $\delta$  можно принять равной всей толщине пленки на поверхности трубопровода, т. е. толщине пленки на поверхностях источника и приемника излучения.

Как видно из графиков, толщина пленки увеличивается с увеличением давления и степени влажности. При постоянном давлении толщина пленки является однозначной функцией степени влажности.

Таким образом, увеличение давления и степени влажности вызывает увеличение поглощения бета-излучения как в паре, так и в пленке. При постоянном давлении степень поглощения излучения является однозначной функцией влажности пара. Так как поверхностная плотность влажного пара (а также плотность сухого насыщенного пара) при постоянном давлении является однозначной функцией  $u_d$ , то при условии постоянства давления пара истинная степень влажности является однозначной функцией диаграммной степени влажности.

Проведенные исследования показали также правильность выбора бета-излучателя.

В четвертой главе рассмотрены вопросы, связанные с разработкой схемы и конструкции прибора для измерения влажности пара в турбине.

Для решения задач, ставящихся перед устройством для измерения влажности пара в турбине, необходимо иметь воз-



возможность исследовать распределение степени влажности за рабочей лопаткой последней ступени турбины, что требует измерения влажности на небольших участках по высоте лопатки.

Необходимость осуществления таких измерений потребовала разработки зонда, вводимого в турбину. Основной частью зонда является измерительная головка, включающая в себя жестко скрепленные на расстоянии 30 мм (или 100 мм) один от другого источник и приемник излучения.

В дне измерительной головки установлен источник излучения. Конструкция источника обеспечила его достаточную прочность, герметичность, малые размеры, минимальное поглощение излучения в самом источнике. Приемник излучения отделяется от паровой среды диафрагмой, конструкция которой предусматривает минимальное поглощение бета-излучения, а также необходимую прочность и герметичность для предотвращения попадания пара внутрь зонда.

В качестве приемника излучения выбран торцовый газоразрядный счетчик бета-частиц типа СБТ-7. В связи с тем, что температура паровой среды, в которую помещается зонд, может превышать  $+50^{\circ}\text{C}$ , счетчик охлаждается путем обдува сжатым воздухом.

При выборе схемы прибора для измерения и автоматического контроля степени влажности пара в паровой турбине предпочтение было отдано автокомпенсационной схеме, как обеспечивающей минимальные аппаратные погрешности. Проведен анализ имеющихся автокомпенсационных схем с точки зрения возможности их использования в разрабатываемом приборе. Показано, что в данном случае наиболее целесообразно применение автокомпенсационной схемы с двумя источниками и двумя приемниками излучения и использованием в качестве приемников излучения газоразрядных галогенных счетчиков.

При работе счетчиков в импульсном режиме и ограничении скорости счета величиной  $10^3 \frac{\text{имп}}{\text{сек}}$  погрешности измерения интенсивности бета-излучения не превысят допустимые. Ограничение величины скорости счета вынуждает идти на меньшее быстродействие прибора, что, однако, допустимо, так как изменение величины влажности пара в турбине происходит сравнительно медленно.

При разработке схемы прибора для измерения влажности пара был применен метод компенсации основного потока излучения путем использования вспомогательного подвижного источника. Была разработана схема, в которой компенсация

рабочего бета-излучения осуществляется путем автоматического перемещения источника компенсирующего бета-излучения относительно своего приемника с помощью кулачкового механизма. Разностный сигнал поступает на реверсивный электродвигатель, связанный с кулачковым механизмом. При изменении влажности пара разностный сигнал становится отличным от нуля, и электродвигатель приходит во вращение, приводя во вращение кулачок. Толкатель кулачкового механизма, несущий на конце источник компенсирующего излучения, перемещает этот источник относительно приемника до тех пор, пока разностный сигнал вновь не станет равным нулю. Вращение электродвигателя вызывает изменение показаний вторичного прибора.

Метод компенсации рабочего излучения путем перемещения источника компенсирующего излучения в применении к бета-излучению является чрезвычайно удобным, так как обеспечивает необходимую степень поглощения компенсирующего излучения и плавное его изменение.

Разработана методика расчета параметров схемы, обеспечивающих измерение степени влажности с заданной точностью. Активность (в милликюри) источника рабочего излучения определяется из соотношения:

$$A_p = \frac{6,8 \cdot 10^{-7} (1 - y)^4 e^{\mu_m(\rho_n d_n + \rho_f d_f + P_{сч} + P_{\text{maxmax}})}}{t_{\text{изм}} S_p (\mu_m)^2 (\rho'')^2 (\Delta y)^2}, \quad (11)$$

где  $\rho_n$ ,  $d_n$  — плотность материала и толщина передней стенки источника рабочего излучения;  $\rho_f$ ,  $d_f$  — плотность и толщина фольги перед приемником рабочего излучения;  $P_{сч}$  — поверхностная плотность окошка торцового счетчика;  $t_{\text{изм}}$  — время измерения числа импульсов;  $S_p$  — эффективная площадь приемника рабочего излучения;  $P_{\text{maxmax}}$  — максимальная поверхностная плотность влажного пара на пути рабочего излучения (при максимально возможных влажности и давлении).

Активность (в милликюри) источника компенсирующего излучения определяется из соотношения:

$$A_k = \frac{A_p S_p d_k^2 \text{maxmax} e^{-\mu_m(\rho_n d_n + \rho_f d_f - \rho'_n d'_n + P_{\text{maxmax}} - \rho_v d_k \text{maxmax})}}{S_k d^2}, \quad (12)$$

где  $\rho'_n$ ,  $d'_n$  — плотность материала и толщина передней стенки источника компенсирующего излучения;  $S_k$  — эффективная площадь приемника компенсирующего излучения;  $\rho_v$  — плотность воздуха;  $d_k \text{maxmax}$  — максимально возможное расстояние от источника до приемника компенсирующего излучения.

Разработана методика расчета профиля кулачка, обеспечивающего линейность шкалы прибора.



Описанная автокомпенсационная схема с подвижным источником бета-излучения может найти применение и в других случаях использования бета-излучения в радиоизотопном приборостроении, в частности, для измерения плотности и влажности газов.

В пятой главе приведены результаты промышленной проверки работы прибора для контроля влажности. Разработана методика тарировки прибора и выполнена тарировка на контуре влажного пара, в котором создавались те же условия для пара, что и в том месте турбины, где предполагалась установка зонда.

Прибор для измерения влажности пара прошел промышленные испытания на турбине Харьковского турбинного завода. Зонд был установлен таким образом, чтобы измерительная головка находилась на расстоянии 30 мм от лопаток рабочего колеса последней ступени турбины и могла перемещаться от корня до периферии лопатки. Испытания показали стабильную работу прибора. Абсолютная погрешность измерения влажности пара не превышала  $\pm 0,5\%$ . С помощью прибора для измерения влажности пара на турбине Харьковского турбинного завода было проведено исследование распределения степени влажности пара по высоте рабочей лопатки. При исследовании был обнаружен ряд явлений, характерных для течения влажного пара в турбине и ранее в литературе не описанных. В частности, показано, что увеличение средней диаграммной степени влажности приводит к увеличению влажности во всех сечениях по высоте за рабочей лопаткой. Результаты измерения степени влажности были использованы Харьковским турбинным заводом.

Основные итоги диссертационной работы заключаются в следующем:

1. Проведена систематизация имеющихся методов и устройств для измерения степени влажности пара по признаку измеряемой ими модификации степени влажности. Проведен анализ этих устройств с точки зрения возможности их использования для автоматического контроля влажности пара в турбине. Показано, что наиболее удовлетворительным методом для измерения и автоматического контроля влажности пара является радиоизотопный, так как он дает возможность измерения влажности без отбора пробы, непосредственно в потоке, независимо от размеров капель влаги в потоке пара.

2. Предложен метод измерения влажности пара в турбине по поглощению бета-излучения. Выведены расчетные соотношения для определения степени влажности парового потока.

3. Разработана методика учета влияния пленок влаги, образующихся на поверхностях источника и приемника излучения, помещенных в поток пара.

4. Предложен метод исследования течения влажного пара путем сравнения значений поверхностной плотности поглотителя, определенных расчетным путем и по поглощению бета-излучения. Получены соотношения для определения ряда важных характеристик течения влажного пара.

5. Проведено экспериментальное изучение течения влажного пара методом бета-просвечивания на контуре влажного пара, собранном на Харьковском турбинном заводе, в широком интервале значений давления, скорости и влажности. Показано, что поверхностная плотность поглотителя между источником и приемником излучения при постоянном давлении является однозначной функцией степени влажности. Определены значения поверхностной плотности поглотителя при условиях, имеющих место на последних ступенях турбины.

6. Разработан зонд для измерения влажности пара в турбине на участках длиной 30 мм и 100 мм. Разработана конструкция источника излучения и диафрагмы, устанавливаемой между потоком пара и приемником излучения.

7. Проведен анализ имеющихся автокомпенсационных схем с точки зрения возможности их использования в приборе для измерения влажности пара. Показано, что в данном случае наиболее целесообразно применение автокомпенсационной схемы с двумя источниками и двумя приемниками бета-излучения и использованием в качестве детекторов газоразрядных счетчиков.

8. Разработана автокомпенсационная схема, в которой компенсация рабочего потока бета-излучения осуществляется путем перемещения источника компенсирующего бета-излучения относительно приемника с помощью кулачкового механизма. Разработана методика расчета параметров схемы, обеспечивающих измерение влажности с заданной точностью и линейность шкалы прибора.

9. Предложена методика тарировки прибора и выполнена его тарировка на контуре влажного пара.

10. Прибор прошел промышленные испытания на паровой турбине Харьковского турбинного завода, показавшие стабильную работу прибора. Прибор измеряет степень влажности с точностью, удовлетворяющей требованиям промышленности.

11. С помощью прибора для измерения и автоматического контроля влажности пара по поглощению бета-излучения было проведено исследование распределения влажности пара вдоль



лопатки последней ступени паровой турбины без отбора пробы пара. При исследованиях был обнаружен ряд ранее неизвестных явлений, характерных для течения влажного пара в турбине.

Результаты работы докладывались на совещаниях Всесоюзного семинара по применению радиоактивных изотопов в измерительной технике и приборостроении во Фрунзе, Харькове и Тбилиси, на Республиканских конференциях по проблеме «использование атомной энергии» в Киеве и Харькове. Прибор для измерения влажности пара экспонировался в 1962 г. на ВДНХ СССР.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

1. Корсунский М. И., Лагунов А. С., Байвель Л. П. Применение радиоактивных изотопов для контроля параметров движущегося влажного пара. Сборник «Радиоактивные методы автоматического контроля» (Труды расширенного совещания Всесоюзного семинара по применению радиоактивных изотопов в измерительной технике и приборостроении), т. I, Изд. АН Киргиз. ССР, Фрунзе, 1963.

2. Корсунский М. И., Лагунов А. С., Байвель Л. П., Синельников А. Н. Применение радиоактивных изотопов для измерения влажности пара. «Измерительная техника», № 5, 1960.

3. Байвель Л. П., Корсунский М. И., Лагунов А. С. Прибор для исследования состояния пара на последних ступенях паровой турбины. Тезисы докладов Всесоюзного семинара по радиоизотопной измерительной технике. Изд. АН Груз. ССР, Тбилиси, 1962.

4. Корсунский М. И., Лагунов А. С., Байвель Л. П. Применение радиоактивных изотопов для контроля параметров пара, в серии «Передовой научно-технический и производственный опыт», изд. Центрального института технико-экономической информации, вып. I, Москва, 1962.

5. Байвель Л. П., Зильбер Т. М., Косяк Ю. Ф., Лагунов А. С., Нахман Ю. В. Некоторые результаты измерения степени влажности пара на экспериментальной паровой турбине, «Энергомашиностроение», № 8, 1964.

6. Байвель Л. П., Лагунов А. С., Корсунский М. И. Устройство для определения влажности пара в потоке. Авторское свидетельство № 906497, 1964 г.

Центральная научная  
Библиотека

328963