Кандидатные технологии для системы нейтральной инжекции реактора ДЕМО [[1]](#footnote-1)\*)

Ананьев С.С., Панасенков А.А., Длугач Е.Д., Крылов А.И.

НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия, Ananyev\_SS@nrcki.ru

В проектируемых в настоящее время энергетических установках для управляемого термоядерного синтеза (УТС) с удержанием плазмы в магнитном поле в вакуумных камерах с тороидальной конфигурацией, токамак, предусматриваются системы нейтральной инжекции (СНИ) мощных пучков атомов изотопов водорода для нагрева плазмы до условий, обеспечивающих эффективное протекание термоядерных реакций, и для обеспечения устойчивого поддержания тока в шнуре плазмы (см., например, хорошо известный международный проект ITER, а также многие национальные проекты в Европе, Китае, Японии и др.). Энергия атомов пучка в значительной степени определяется параметрами плазмы и размерами плазменного шнура. Для энергетической установки она составит до 500 кэВ на нуклон – при такой энергии частиц для эффективной нейтрализации целесообразно использовать пучок отрицательных ионов (ОИ), поскольку эффективность получения атомов из положительных ионов становится ничтожно малой уже при энергии свыше 150 кэВ на нуклон.

На данный момент самым представительным является разрабатываемый международной командой инжектор в составе ИТЭР, который мы будем рассматривать в качестве базовой концепции для проекта ДЕМО РФ. Основными частями инжектора всегда будут источник ОИ, ускоритель пучка ОИ, обдирочная мишень – нейтрализатор, приемники остаточных ОИ и сгенерированных положительных ионов, абсолютный клапан-шибер на входе в атомопровод, по которому пучок атомов проходит до выходного окна в токамак. А также основные обеспечивающие системы: электропитания, откачки выделившегося в инжекторе газа, экранировки рассеянного магнитного поля от токамака вдоль пути пучка в виде ОИ, охлаждения компонентов тракта, нагружаемых пучком и т.д.

Для работы СНИ в составе энергетической установки большое значение имеет её КПД, который в значительной мере определяется эффективностью преобразования ОИ в атомы в нейтрализаторах и потерями нейтрального пучка (НП) при его движении по тракту к входному окну токамака. Так для СНИ ИТЭР, в инжекторах которой предусмотрена нейтрализация ОИ в газовых нейтрализаторах, многочисленные оценки полного КПД системы дают значения не более 30%. При этом более 40% потерь мощности НП относятся к эффективности нейтрализации (Фмакс), которая менее 60%. Кроме того, вытекающий из нейтрализатора газ создаёт по тракту повышенное фоновое давление, на котором теряется ещё до 10% мощности НП из-за процесса ре-ионизации атомов. Поскольку трудно ожидать заметного увеличения КПД систем, обеспечивающих работу СНИ, основная задача ложится на повышение КПД всего пучкового тракта.

В докладе приводится анализ технологий, которые могут быть использованы в различных элементах инжекционного тракта с целью повышения Фмакс и эффективности транспортировки НП в плазму. Рассмотрены преимущества и недостатки различных схем с нейтрализаторами: газовым, плазменным, фотонным и на основе сверхзвуковой струи паров лития.

Работа выполнена при поддержке НИЦ «Курчатовский институт» (14.08.2019 № 1805)

1. \*) [DOI – тезисы на английском](http://www.fpl.gpi.ru/Zvenigorod/XLVII/Mu/en/AK-Anan%27ev_e.docx) [↑](#footnote-ref-1)