

УДК 621.039.586

## ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ СРЕДСТВ ЗАЩИТЫ РЕАКТОРОВ ВВЭР-1000

Ю.В. Браславский, к.т.н.

*Севастопольский национальный университет ядерной энергии и промышленности*

Показана эффективность дополнительных средств защиты реакторов типа ВВЭР в случае возникновения аварийной ситуации, подобной аварии на АЭС «Три-Майл-Айленд». Определены основные показатели, характеризующие степень надежности активной зоны реактора ВВЭР-1000 при наличии и отсутствии ускоренной предупредительной защиты.

### Введение

Обеспечение безопасности энергетических реакторов большой мощности – одна из приоритетных задач современной атомной энергетики. Известно, что наиболее важным требованием безопасности является способность средств защиты реактора при достижении заданных пределов безопасной эксплуатации остановить цепную реакцию деления. Для этой цели служит система аварийной защиты реактора, которая формирует команду на падение органов регулирования в активную зону при возникновении аварийной ситуации. Однако необходимость быстрой остановки реактора при любых ненормальных режимах не подтвердилась в процессе эксплуатации [1].

Опыт эксплуатации реакторных установок показал, что в некоторых случаях срабатывание системы аварийной защиты можно заменить работой нового устройства, обладающего более высокими основными техническими характеристиками. Таким устройством является система ускоренной предупредительной (УПЗ), использование которой приводит к повышению динамической устойчивости работы энергоблока в случаях непредусмотренного отключения основного оборудования путем быстрого снижения мощности реактора и турбоагрегата за счет сброса в активную зону одной группы органов регулирования. Применение УПЗ вместо аварийной защиты не только позволяет полностью не останавливать реактор, но и, как правило, не приводит к появлению «йодной ямы» [2].

Оценить эффективность ускоренной защиты можно на примере аварии на АЭС «Три-Майл-Айленд» с учетом того, что система УПЗ на зарубежных аналогах ВВЭР (например, на реакторах PWR компании «Westinghouse Electric», США), как правило, отсутствует. Система ускоренной предупредительной защиты достаточно полно описана в многочисленных работах, в частности [3, 4], но количественно эффективность УПЗ до сих пор не определена в связи со сложностью подтверждения теоретических расчетов натурными испытаниями.

### Постановка цели и задач научного исследования

Целью данной работы является определение количественной эффективности ускоренной предупредительной защиты при возникновении аварийной ситуации на ядерной энергетической установке с реактором ВВЭР-1000. Для выполнения поставленной цели необходимо решить следующие научные задачи:

- определить исходные события для рассматриваемой аварии;
- определить основные параметры, характеризующие уровень безопасности ЯЭУ с ВВЭР и, в первую очередь, активной зоны;
- определить значения этих параметров в случаях срабатывания и несрабатывания ускоренной предупредительной защиты.

### **Исходные события для рассматриваемой аварии**

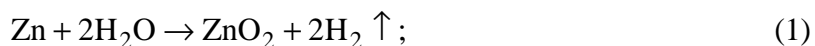
Как известно, на одном из энергоблоков АЭС «Три-Майл-Айленд» в марте 1979 года произошла аварийная ситуация, которая привела к частичному расплавлению активной зоны реактора. Причины этого были следующие. В результате отключения основных насосов питательной воды и закрытого состояния арматуры на линиях аварийной питательной воды автоматически отключилась турбина, а реактор остался на номинальной мощности и отключился лишь аварийной защитой по превышению давления в первом контуре (котловая вода в парогенераторах выкипела, и отвод тепла от первого контура прекратился). При дальнейшем увеличении давления в первом контуре открылся предохранительный клапан компенсатора давления и после снижения давления не закрылся из-за отказа, то есть образовалась течь первого контура, и количество теплоносителя стало уменьшаться. Дальнейшие неправильные действия оперативного персонала привели к образованию парового пузыря в активной зоне, который препятствовал работе насосов систем безопасности. В итоге произошли перегрев активной зоны реактора и ее частичное расплавление.

На действующих установках с реакторами ВВЭР-1000 в случае возникновения подобной аварии и сходных действий персонала ситуация сложилась бы несколько иная. После отключения турбины мощность реактора не осталась бы на номинальном уровне, а снизилась до 30...40 % номинальной в результате срабатывания УПЗ (падения одной группы в активную зону) и последующей работы устройства разгрузки и ограничения мощности реактора (поочередного движения групп вниз с рабочей скоростью). В настоящей работе будет исследован положительный эффект от срабатывания дополнительной защиты на ЯЭУ с ВВЭР-1000.

### **Основные параметры, определяющие уровень безопасности активной зоны реактора ВВЭР**

Основными параметрами, характеризующими уровень безопасности ЯЭУ с ВВЭР, являются следующие величины [2]:

– температура наружной поверхности оболочки твэла – характеризует состояние основного параметра безопасности. При температуре оболочки более 350 °С начинается поверхностное кипение теплоносителя, что приводит к окислению оболочек твэла, при температуре более 450 °С начинается уже более интенсивное окисление циркония, при 700 °С начинается пароциркониевая реакция, интенсивность которой значительно возрастает при 1000 °С:



– температура топлива в топливной таблетке – характеризует теплофизическое и термомеханическое состояние топлива. При температуре топлива 2200...2500 °С начинается изменение структуры двуоксида урана, а при температуре более 2800 °С (для облученного топлива) или 3000 °С (для свежего топлива) начинается плавление топливной таблетки;

– коэффициент запаса до кризиса теплообмена DNBR, определяющий запас до кризиса теплообмена на поверхности оболочки твэла. DNBR должен быть больше единицы.

$$\text{DNBR} = \frac{q_{\text{крит}}}{q_{\text{max}}}, \quad (2)$$

где  $q_{\text{крит}}$  – критический тепловой поток;

$q_{\text{max}}$  – максимальный тепловой поток;

– время до начала плавления активной зоны – характеризует степень защищенности активной зоны реактора, а также определяет возможность оператора оценить сложившуюся ситуацию и принять соответствующие меры.

### Оценка эффективности ускоренной предупредительной защиты

Для анализа влияния УПЗ на состояние активной зоны при возникновении аварийной ситуации использовалась учебно-научная лаборатория «Реакторная физика, управление и безопасная эксплуатация ЯЭУ», разработанная коллективом НИЯУ «Московский инженерно-физический институт» с применением интегрированной среды «Эникад», предназначенной для создания программно-аппаратных комплексов полномасштабных компьютерных анализаторов и тренажеров различного класса для атомных и тепловых электростанций. Данная лаборатория была поставлена в СНУЯЭиП в результате совместного проекта МАГАТЭ и НАЭК «Энергоатом» (лицензия на программное обеспечение: МЕРНИ-IL-13-20013-001). Важным преимуществом используемой лаборатории является возможность наблюдения параметров, которые оператором не контролируются, а также моделирования процессов, запрещенных на реальной ЯЭУ.

В ходе исследования выполнялись два типа моделирования аварии, подобной той, которая произошла на АЭС «Три-Майл-Айленд», со схожими ошибочными действиями оперативного персонала. В первом случае переходные процессы происходили с участием всех средств защиты реактора ВВЭР-1000, во втором - к начальным условиям было добавлено несрабатывание ускоренной предупредительной защиты. Моделирование выполнялось до достижения температуры оболочек твэла порядка 2700 °С (рис. 1) и устойчивой генерации водорода в активной зоне реактора.

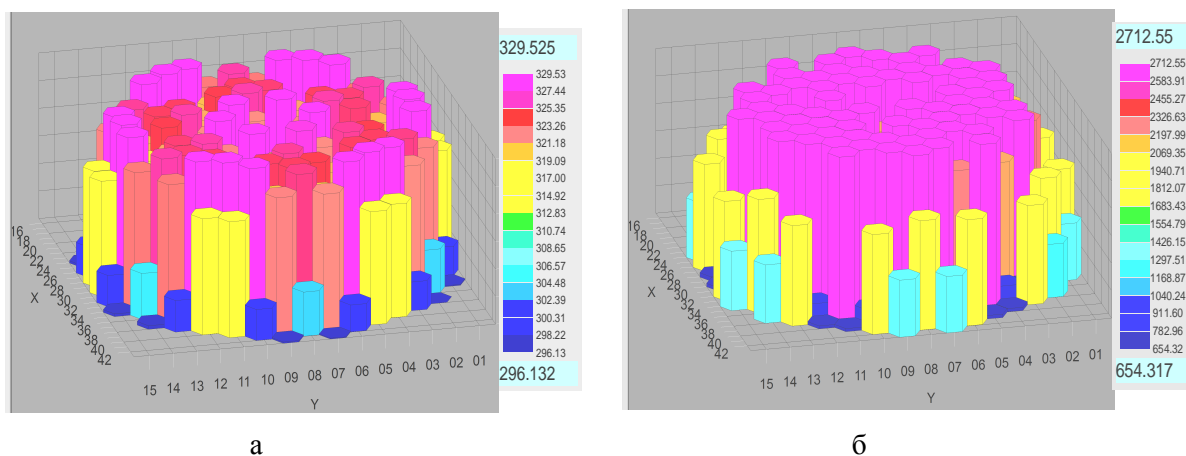


Рис. 1. Трехмерное распределение температуры оболочек твэла по выбранному сечению активной зоны: а – в начале моделирования аварии; б – после окончания моделирования

Как уже отмечалось выше, в результате отключения турбогенератора при наличии ускоренной предупредительной защиты реактор не остался на номинальной мощности в результате падения одной группы органов регулирования в активную зону. При этом также снизились параметры теплоносителя первого контура: температура и давление.

Снижение давления оказывает значительный положительный эффект на развитие аварийной ситуации, так как основные проблемы на АЭС «Три-Май-Айленд» начались после открытия и незакрытия предохранительного клапана компенсатора давления (ПК КД), то есть после начала утечки теплоносителя из первого контура.

В случае срабатывания УПЗ увеличение давления до уставки открытия ПК КД наступает значительно позже, так как рост давления после прекращения теплоотвода от первого контура начинается не со  $160 \text{ кгс/см}^2$  (рис. 2, а), а примерно со  $150...152 \text{ кгс/см}^2$  (рис. 2, б).

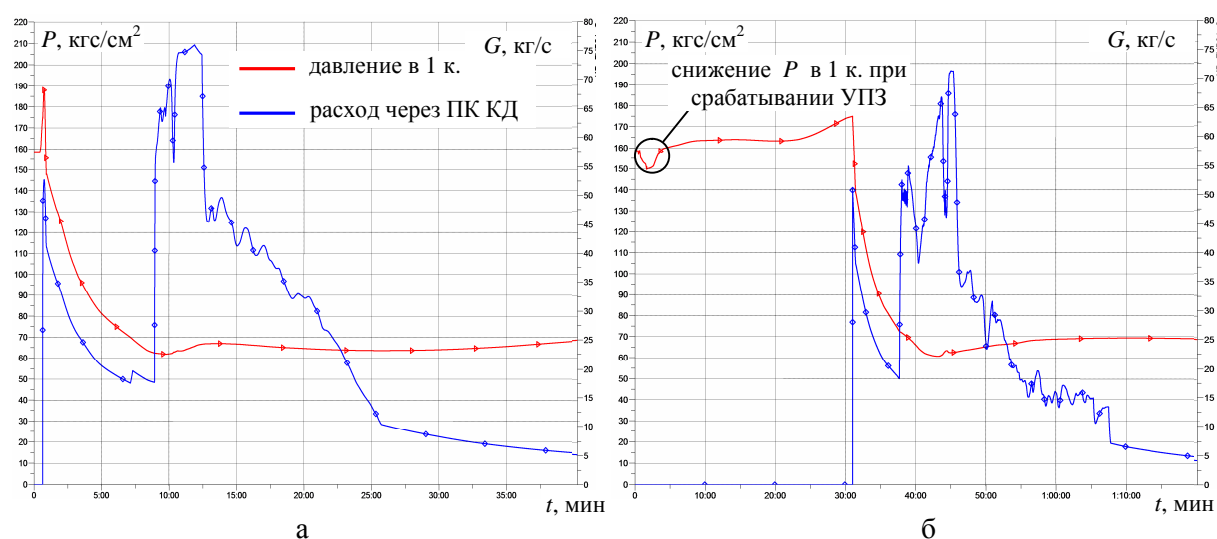


Рис. 2. Изменение давления в первом контуре и расхода через ПК КД: а – при отсутствии УПЗ; б – при срабатывании УПЗ

Также следует заметить, что при отсутствии УПЗ аварийная защита срабатывает по сигналу высокого давления в первом контуре ( $180 \text{ кгс/см}^2$ ), тогда как при срабатывании ускоренной защиты первоначально отключаются главные циркуляционные насосы первого контура (по сигналу низкого уровня котловой воды в парогенераторах) и аварийная защита сбрасывается в результате останова этих насосов.

В процессе развития аварии в результате выкипания парогенераторов происходит срыв естественной циркуляции теплоносителя первого контура. Совместно с течью первого контура из парового пространства КД это приводит к вскипанию теплоносителя и образованию парового пузыря над активной зоной, который препятствует работе систем безопасности, а также снижению давления в контуре до срабатывания пассивной системы безопасности (гидроаккумулирующих емкостей).

Отсутствие необходимого теплоотвода от активной зоны приводит к повышению температуры топлива (рис. 3), перегреву оболочек тепловыделяющих элементов и, в конечном итоге, к их расплавлению. Однако при срабатывании УПЗ повышение температуры над активной зоной до критического значения происходит значительно медленнее, чем при отсутствии дополнительной защиты (рис. 4). Это связано с тем, что в первом случае предохранительный клапан КД открылся гораздо позже, то есть течь теплоносителя образовалась не сразу, а через некоторый промежуток времени.

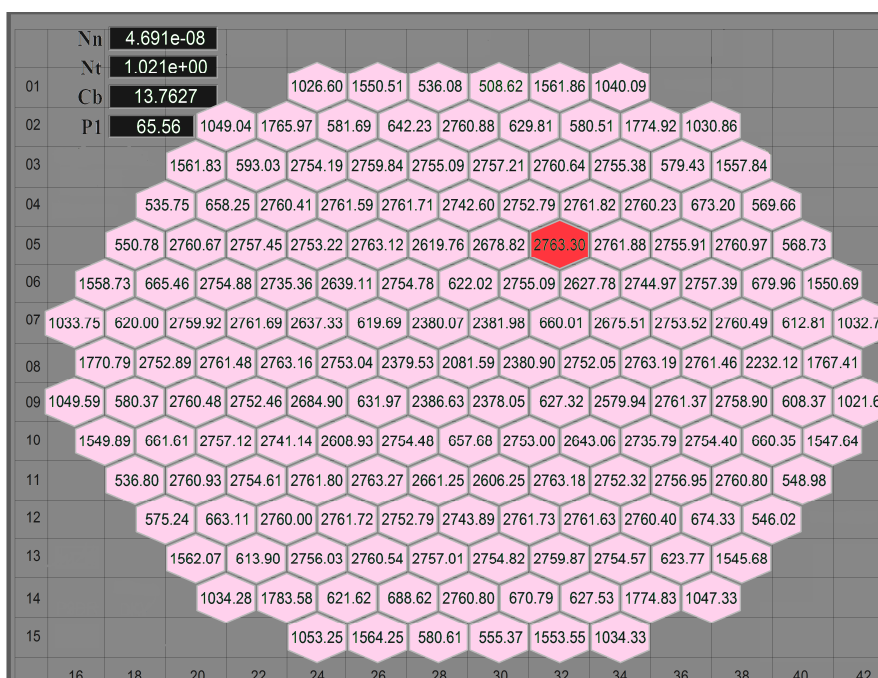


Рис. 3. Распределение температуры топлива по объему активной зоны

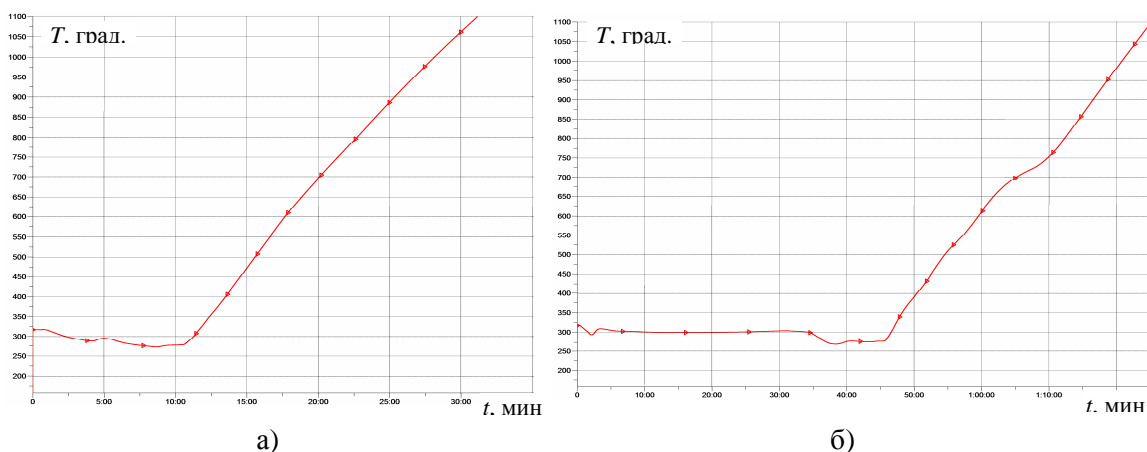


Рис. 4. Изменение температуры над активной зоной реактора: а – при отсутствии УПЗ; б – при срабатывании УПЗ

Важным параметром, характеризующим надежность средств защиты ЯЭУ в данной ситуации, является время до начала возникновения парциркуляционной реакции, то есть время до начала плавления активной зоны. Зависимости, приведенные на рис. 5, однозначно показывают положительное влияние ускоренной предупредительной защиты на данный параметр. Если в первом случае (при отсутствии УПЗ) плавление оболочек твэла началось уже к 20-й минуте переходного процесса, то во втором случае (при срабатывании УПЗ) это время увеличивается примерно до 60 мин.

Таким образом, в результате анализа эффективности дополнительных средств защиты ЯЭУ с реактором ВВЭР-1000 получены численные значения основных параметров, характеризующих уровень безопасности активной зоны реактора. Результаты моделирования аварийной ситуации показали, что наличие УПЗ не влияет на итоговые значения большинства параметров (коэффициента запаса до кризиса теплообмена, температур топлива и оболочек твэла), но оказывает положительное влияние на динамику развития

аварии и, самое главное, на время до начала плавления активной зоны, увеличивая его практически в три раза и позволяя при этом персоналу исправить свои ошибки и предпринять действия по недопущению повреждения активной зоны реактора.

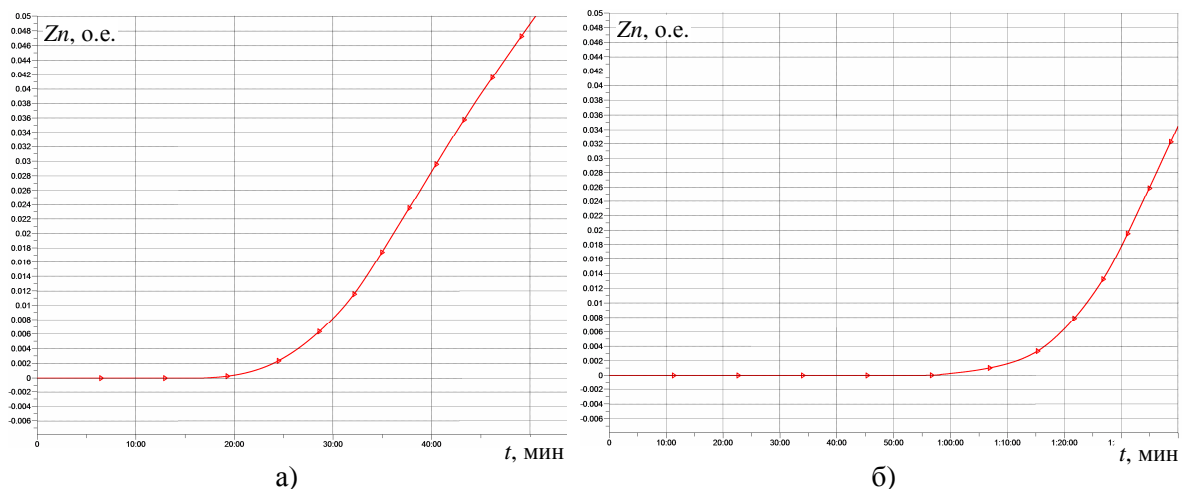


Рис. 5. Количество прореагировавшего циркония: а – при отсутствии УПЗ; б) – при срабатывании УПЗ

Следовательно, наличие ускоренной предупредительной защиты позволяет значительно повысить надежность ядерной установки даже в случае возникновения тяжелой аварии при неправильных действиях оперативного персонала.

Кроме того, используемая модель представляет интерес для дальнейшего исследования действий персонала и процессов, протекающих в ЯЭУ при различных аварийных ситуациях, в целях недопущения повреждения активной зоны и выхода радиоактивных продуктов деления за допустимые пределы.

### Выводы

1. Основными параметрами, характеризующими уровень безопасности ЯЭУ с ВВЭР в случае возникновения тяжелой аварии, являются температура топлива, температура оболочки твэла, коэффициент запаса до кризиса теплообмена и время до начала плавления активной зоны реактора.
2. Наличие ускоренной предупредительной защиты положительно влияет на динамику развития аварии даже при неправильных действиях оперативного персонала.
3. Срабатывание ускоренной предупредительной защиты при прочих равных условиях почти в три раза увеличивает время до начала повреждения активной зоны реактора, позволяя провести комплекс действий по недопущению этого явления.
4. Представляет интерес проведение дальнейших исследований в целях недопущения повреждения активной зоны реактора ВВЭР-1000 при различных аварийных ситуациях.

## ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ДОДАТКОВИХ ЗАСОБІВ ЗАХИСТУ РЕАКТОРІВ ВВЕР-1000

Ю.В. Браславський

Показана ефективність додаткових засобів захисту реакторів ВВЕР виникнення аварійної ситуації, подібної аварії на АЕС «Три-Майл-Айленд». Визначені основні показники, що характеризують ступінь надійності активної зони реактора ВВЕР-1000 за наявності і відсутності прискореного попереджувального захисту.

## EFFICIENCY EVALUATION of ADDITIONAL REACTOR WWER-1000 CRASH PROTECTION

**Yu. Braslavskiy**

Efficiency of additional crash protection of the WWER reactors in the emergency situation like that at Three Mile Island NPP was shown. Main criteria characterizing WWER-1000 reactor core reliability degree under accelerated alarm system or without it were defined.

### Список использованных источников

1. *Иванов В.А.* Эксплуатация АЭС: учебник для вузов / В.А. Иванов. – СПб.: Энергоатомиздат, Санкт-Петербургское отд-ние, 1994. – 384 с.
2. *Выговский С.Б.* Безопасность и задачи инженерной поддержки эксплуатации ядерных энергетических установок с ВВЭР: учеб. пособие / С.Б. Выговский, Н.О. Рябов, Е.В. Чернов. – М.: НИЯУ МИФИ, 2013. – 304 с.
3. *Аникевич К.П.* Системы управления и защиты реактора ВВЭР-1000: учеб. пособие / К.П. Аникевич. – 2-е изд., перераб. – Севастополь.: СТУЯЭиП, 2006. – 206 с.
4. *Баклушин Р.П.* Эксплуатационные режимы АЭС: учеб. пособие для вузов / Р.П. Баклушин. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: МЭИ, 2012. – 532 с.

Надійшла до редакції 02.12.2013 р.

УДК 621. 643: 532. 528

## АНАЛИЗ ГАЗОДИНАМИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ ПОТОКА И ПРИРОДЫ ВОЗМУЩАЮЩИХ СИЛ В РАБОЧИХ ЛОПАТКАХ ПОСЛЕДНЕЙ СТУПЕНИ ЦНД ТУРБИНЫ К-1000-60/3000

**О.З. Емец, к.т.н.**

*Севастопольский национальный университет ядерной энергии и промышленности*

Изложены обстоятельства поломки рабочей лопатки последней ступени цилиндра низкого давления (ЦНД) турбоагрегата К-1000-60-3000. Рассмотрены конструктивные особенности периферийной части этой ступени и связанная с ними газодинамическая структура потока, а также возмущающие силы, способные вызвать изгибные и крутильные колебания периферийной части рабочих лопаток в ступени большой верности. Сделано предположение о возможном субгармоническом резонансном или околорезонансном от возмущающих сил 1-го рода характере колебаний периферийной части лопатки.

### Введение

Задачи, связанные с влиянием периодической нестационарности и высокой турбулентности в проточных частях турбомашин, до настоящего времени не решены. Не закончено изучение природы возмущающих сил при взаимодействии решёток в потоках конденсирующегося и влажного пара.