

11528

На правах рукописи

Министерство высшего и среднего специального
образования СССР

Челябинский политехнический институт
имени Ленинского комсомола

ЛЕБЯГИН Иван Павлович

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКОЙ НАДЕЖНОСТИ
ОБОГРЕВАЕМЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПАРОГЕНЕРАТОРОВ
СВЕРХКРИТИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ

Специальность 05.14.04 - "Промышленная
теплоэнергетика"

Автореферат
диссертация на соискание ученой
степени кандидата технических наук

Челябинск - 1973

Работа выполнена в Уральском филиале Всесоюзного тепло-технического института имени Ф.Э.Дзержинского.

Научный руководитель - кандидат технических наук
В.Г.ЧАКРЫГИН.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор И.И.МОРОЗОВ,
кандидат технических наук, доцент В.А.ГЕРАЙГА.

Ведущее предприятие - Подольский ордена Ленина машино-строительный завод имени Орджоникидзе.

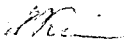
Автореферат разослан " ____ " _____ 1973 г.

Защита диссертации состоится "10" октября 1973 года, в 15 часов, в аудитории 244 на заседании Ученого Совета энергетического и приборостроительного факультетов Челябинского политехнического института имени Ленинского комсомола.

Ваши отзывы и замечания в двух экземплярах, заверенных гербовой печатью, просим направлять по адресу: 454044, Челябинск, 44, проспект им.В.И.Ленина, 76.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Ученый секретарь совета
кандидат технических наук, доцент



Ю.А.КОРОЛЕНКО

Обеспечение надежной работы поверхностей нагрева парогенераторов являлось одной из актуальнейших проблем парогенераторостроения на всех этапах его развития. Особое значение приобретает указанная проблема для парогенераторов сверхкритического давления, работающих в энергоблоках 300, 500 и 800 Мвт. При этом одним из важных условий надежности поверхностей нагрева является обеспечение устойчивости их рабочих процессов.

Явление неустойчивости по отношению к процессам в обогреваемых элементах парогенераторов и других кипящих аппаратов характеризуется невозможностью стабильного поддержания ряда теплотехнических параметров, например, расхода среды, на заданном уровне без применения стабилизирующих средств. При этом неустойчивость может наблюдаться как для парогенератора в целом, известная под термином "общекотловая неустойчивость", так и для отдельных параллельно включенных элементов или каналов, именуемая "локальной неустойчивостью". Известными примерами явления локальной неустойчивости могут служить межвитковые пульсации, при которых наблюдаются колебания потока в параллельных каналах с определенным сдвигом по фазе, при которых параметры процесса парогенератора в целом остаются на уровне, близком к номинальному.

Большую актуальность имеют вопросы изучения локальной неустойчивости, так как общекотловая устойчивость обеспечивается сравнительно просто рациональным выбором характеристик элементов гидравлической схемы парогенератора и питательных устройств.

По своему характеру неустойчивость процесса применительно к обогреваемым элементам кипящих аппаратов подразделяется на аperiodическую и колебательную. Аperiodическая неустойчивость связана с видом статической гидравлической характеристики элемента и имеет место при многозначности последней. При попадании

режима в область аperiodической неустойчивости любое, сколь угодно малое возмущение вызывает аperiodический уход к какому-то новому, аperiodически устойчивому режиму, то есть аperiodически неустойчивые режимы практически реализованы быть не могут. В зависимости от сочетания конструктивных и режимных параметров процесса новый, аperiodически устойчивый режим соответствует либо весьма малым положительным расходам среды, либо даже отрицательным расходам ("опрокидывание" движения среды). В последнее время к одному из видов нарушений аperiodической устойчивости условно относят явление высокой чувствительности параметров процесса к внешним статическим возмущениям, примером чего могут являться значительные теплогидравлические разверки при незначительности конструктивных параметров и особенно тепловосприимчивости отдельных параллельно работающих каналов или элементов.

Все перечисленные виды нарушений устойчивости фиксировались в ряде промышленных и экспериментальных исследований при сверхкритических давлениях и в дальнейшем относятся к явлениям статической неустойчивости, так как обусловлены видом статической гидравлической характеристики элемента. Возникновение таких явлений вызывает обычно опасный температурный режим обогреваемых каналов.

Явление колебательной неустойчивости характеризуется близкими к периодическим колебаниями отдельных параметров процесса относительно их номинальных значений. В зависимости от частоты генерируемых автоколебаний различают колебательную неустойчивость низкочастотную ($10^{-2} + 1$ гц), и высокочастотную (более 10^2 гц). Для элементов парогенераторов возникновение высокочастотных колебаний не характерно и основную опасность представляют низкочастотные колебания, приводящие к циклическим изменениям температуры стенок каналов, что может повлечь за собой их разрушение.

Проведенные к настоящему времени расчетно-теоретические, экспериментальные и промышленные исследования явлений неустойчивости применительно к обогреваемым элементам парогенераторов сверхкритического давления рассматривают в основном отдельные виды нарушений статической устойчивости. Указанные исследования позволили ответить на ряд важных вопросов и дать соответствующие

рекомендации по обеспечению надежности элементов с точки зрения статической устойчивости. В то же время, имеется ряд вопросов, требующих дальнейшего исследования. Применяемые методики расчетно-теоретического исследования явлений статической неустойчивости, например, определения границ аperiodической неустойчивости, весьма далеки от совершенства в смысле трудоемкости, точности и возможности обобщения результатов расчета.

Число работ по исследованию пульсаций в обогреваемых элементах при сверхкритических давлениях весьма ограничено, предложенные методики расчета границ колебательной неустойчивости не учитывают специфики элементов парогенераторов СКД, а малый объем расчетно-теоретического анализа не позволяет сделать окончательных выводов о характере границ колебательной неустойчивости и влиянии на них отдельных конструктивных и режимных факторов.

Основной целью настоящей диссертации является разработка простых, точных и универсальных методик определения границ статической и колебательной неустойчивости по отношению к обогреваемым элементам при СКД и проведение на основе использования этих методик анализа указанных границ. Одновременно предлагаются усовершенствованные методики решения ряда задач статического гидравлического расчета.

Диссертация состоит из введения, шести глав, выводов и приложений.

В первой главе излагается современное состояние вопроса, что позволяет конкретизировать направление дальнейших исследований.

Глава вторая посвящена вопросам математического моделирования процессов в обогреваемых элементах при СКД.

В главах третьей, четвертой и пятой решается ряд задач по исследованию явлений статической и колебательной неустойчивости.

В шестой главе приводятся результаты экспериментальной проверки расчетно-теоретической методики определения границ аperiodической неустойчивости.

П. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА ОБОГРЕВАЕМОГО ЭЛЕМЕНТА ПРИ СВЕРХКРИТИЧЕСКИХ ДАВЛЕНИЯХ

Для проведения теоретического исследования теплогидравлической надежности обогреваемых элементов предлагаются две мате-

математические модели, различающиеся своей полнотой. При этом выбор модели во многом определяется областью применения результатов исследования. Первую, более совершенную модель, целесообразно применять по отношению к конкретным образцам промышленных и экспериментальных установок при наличии достаточного объема информации об объекте. Вторая, несколько упрощенная модель, позволяет получать результаты исследования в довольно обобщенном и универсальном виде, что делает предпочтительным их применение на этапе проектирования новых объектов, когда необходимо проведение многовариантных расчетов.

При математическом моделировании рабочего процесса обогреваемого элемента обычно рассматривают модель процесса в единичном обогреваемом канале, дополняя её граничными условиями, отражающими характер работы канала в системе параллельных каналов. Математическая модель процесса в единичном канале, составленная в одномерном приближении, представляет собой систему уравнений в частных производных, включающую уравнения неразрывности, энергии, количества движения и состояния, дополненную зависимостями для нестационарных процессов в стенке канала, коэффициентов теплоотдачи и путевых потерь. Полученная система дополняется необходимыми граничными условиями.

После введения некоторых общепринятых допущений и ряда преобразований рассматриваемая математическая модель может быть представлена в следующем виде:

уравнение неразрывности

$$\frac{\partial G}{\partial x} - \int \frac{\partial \gamma}{\partial \tau} = 0 \quad (1)$$

уравнение энергии

$$G \frac{\partial i}{\partial x} + \int \gamma \frac{\partial i}{\partial \tau} = P_{вн} - q_{вн} \quad (2)$$

уравнение количества движения в интегральной форме с учетом входного и выходного местных сопротивлений

$$P_{вх} - P_{вых} = \rho_{вх} \frac{G_0^2 V_0}{2g f^2} - \rho_{вых} \frac{G_k^2 V_k}{2g f^2} + \frac{G^2 V_k - G_0^2 V_0}{g f^2} + \quad (3)$$

$$\frac{1}{g f} \int_0^L \left(\frac{\partial G}{\partial \tau} \right) dx + \frac{1}{2g f^2} \int_0^L \lambda_{тр} G^2 V dx + \int_0^L \cos \alpha dx$$

уравнение состояния

$$V = V(t) \quad (4)$$

уравнение нестационарной теплопроводности стенки

$$\frac{\partial t_{ст}}{\partial \tau} = a_{ст} \left(\frac{\partial^2 t_{ст}}{\partial z^2} + \frac{1}{z} \frac{\partial t_{ст}}{\partial z} \right) \quad (5)$$

с граничными условиями

$$\left. \frac{\partial t_{ст}}{\partial z} \right|_{z=0} = \frac{q_{вн}}{\lambda_{ст}}; \quad \left. \frac{\partial t_{ст}}{\partial z} \right|_{z=l} = \frac{q_{нар}(x)}{\lambda_{ст}}$$

уравнение для $q_{вн}$, полученное из обобщенного рассмотрения уравнения Ньютона и критериального уравнения Бинбоа для $Gr_{вн}$:

$$q_{вн} = K_q G^{0,25} M^{-0,24} \lambda^{0,34} (\bar{C})^{0,66} \left(\frac{V}{V_{ст\delta вн}} \right)^{0,48} (t_{ст\delta вн} - t) \quad (6)$$

где

$$K_q = 0,00496 \text{ д }^{-1} \text{ м }^{-2,14} \text{ сек }^{0,48}; \quad \bar{C} = \frac{C_{ст} \delta вн - t}{t_{ст\delta вн} - t}, \quad \frac{\text{ккал}}{\text{кгс } ^\circ \text{С}}$$

уравнение для коэффициента путевых потерь

$$\lambda_{тр} = \frac{1604}{\left[\ln \left(\frac{R_{вн}}{R} - \frac{\theta}{R} \right) \right]^2} \left(\frac{M_{ст\delta вн}}{M} \right)^{0,22} \quad (7)$$

уравнения для значений теплофизических констант

$$\mu = \mu(t); \quad \lambda = \lambda(t); \quad C_p = \left(\frac{\partial i}{\partial t} \right)_p = C_p(t) \quad (8)$$

с граничными условиями по тракту теплоносителя входной коллектор:

$$P_{вх} = const; \quad L_{вх} - L_0 = const$$

выходной коллектор: для всех каналов системы (9)

$$P_{вых} = i \text{ дем}$$

Вторая модель преобразуется из системы (I) введенной следующих допущений:

а) нестационарные процессы в стенке не учитываются, то

есть полагается постоянство во времени теплового потока от стенки к теплоносителю;

б) коэффициент путейх потерь $\Delta\tau$ принимается постоянным.

Указанные допущения значительно упрощают систему (1). В частности, из рассмотрения исключаются уравнения (5), (6), (7), (8) и вторая модель будет включать следующие уравнения: неравнорности (1), энергии (2), количества движения (3) и состояния (4) с граничными условиями (9).

Основной объем дальнейших исследований выполнен с использованием второй математической модели.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГРАНИЦ УСТОЙЧИВОСТИ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА ОБОГРЕВАЕМЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПРИ СВЕРХКРИТИЧЕСКИХ ДАВЛЕНИЯХ

При определении границ устойчивости было решено ограничиться исследованием линеаризованного приближения исходной математической модели, описываемой уравнениями (1), (2), (3), (4) с граничными условиями (9). Правомерность такого подхода при исследовании устойчивости систем рассматриваемого класса доказывается рядом специальных работ, а методика решения задачи значительно упрощается.

После проведения линеаризации и применения преобразования Лапласа по координате времени при нулевых начальных условиях, исходные уравнения в безразмерной форме записи имеют вид:

уравнение неразрывности

$$\frac{d\tilde{\delta G}}{d\tilde{x}} - \tilde{\int} \frac{\tilde{b}_2}{\tilde{b}_1} \tilde{\delta i} = 0 \quad (10)$$

уравнение энергии

$$\frac{d\tilde{\delta i}}{d\tilde{x}} - \frac{\tilde{\int}}{\tilde{b}_1} \tilde{\delta i} = -c_1 h_1(\tilde{x}) \tilde{\delta G} \quad (11)$$

уравнение количества движения (при $\tilde{\delta G}_0 = 1$)

$$BF_1(\tilde{S}) + K_{вх} + K_{вых} \Phi_1(\tilde{S}) + K_2 \Phi_2(\tilde{S}) + \Phi_3(\tilde{S}) = 0 \quad (12)$$

с граничными условиями при $\tilde{x} = 0$

$$\tilde{\delta i}_0 = 0; \quad \tilde{\delta G}_0 = 1 \quad (13)$$

$$\text{где } \tilde{X} = \frac{X}{L}; K_{вк} = \frac{2 \rho \sigma x}{\lambda_0 L}; K_1 = \frac{2}{\lambda_0 L}; K_{ввк} = \frac{\rho \sigma_{вк} x}{\lambda_0 L}; \Delta L = l_k - l_0;$$

$$B = \frac{\delta^2 (\Delta L)^2}{A}; A = \text{sign}(\cos d^*) \cdot \frac{\lambda_0 Q^2}{2 \rho f^2}; \tilde{S} = \tau_0 S; \tau_0 = \frac{L}{W_0};$$

$$h_1(\tilde{X}) = \frac{q_e(\tilde{X})}{q_{\text{ср}}}; q_{\text{ср}} = \frac{q}{L}; \tilde{\delta l} = \frac{\delta l}{L_0}; \tilde{\delta G} = \frac{\delta G}{G_e}; C_1 = \frac{\Delta L}{L_0};$$

$$b_1 = \frac{V_e(\tilde{X})}{V_0}; b_2 = \left(\frac{\partial V}{\partial l} \right)_e \cdot \frac{L_0}{V_e} = - \left(\frac{\partial \tau}{\partial l} \right)_e \cdot \frac{L_0}{\tau_e};$$

$$\Phi_1(\tilde{S}) = 2 b_{1k} \cdot \tilde{\delta G}_k + b_{1k} b_{2k} \tilde{\delta l}_k; \Phi_2(\tilde{S}) = \Phi_1(\tilde{S}) - 2 + \tilde{S} \int \tilde{\delta G} dx;$$

$$\Phi_3(\tilde{S}) = 2 \int b_1 \tilde{\delta G} dx + \int b_1 b_2 \tilde{\delta l} dx; F_1(\tilde{S}) = \int \beta(\tilde{X}) \frac{b_2}{b_1} \tilde{\delta l} dx;$$

$$\beta(\tilde{X}) = \text{sign}(\cos d^*) \cos d(\tilde{X})$$

Линеаризованные уравнения (10) и (11) с граничными условиями (13) образуют независимую подсистему, позволяющую определять значения $\tilde{\delta l}$ и $\tilde{\delta G}$, а уравнение (12) выступает в качестве замыкающего при определении границ устойчивости тем или иным методом.

При исследовании устойчивости процесса применительно к обогреваемым элементам с негоризонтальной компоновкой, широко применяющихся в современных парогенераторах СКД, возникает вопрос рационального выбора определяющих и неопределяющих параметров, так как при таких компоновках значительное влияние на характер процесса оказывает $\Delta P_{\text{нв}}$ и входное дросселирование в ряде случаев оказывается малоэффективным стабилизирующим средством. Анализ системы (П) с граничными условиями (13) показывает, что уравнение границ устойчивости может быть записано в следующем общем виде:

$$F[\rho_{вк}, l_{ex}, l_k, h_1(\tilde{X}), A, K_{вк}, K_1, K_{ввк}, \beta(\tilde{X})] = 0 \quad (14)$$

Такое представление отличается от общепринятых значительно меньшим числом фиксированных параметров, что достигается в первую очередь введением обобщенного комплекса A , отражающего влияние $\Delta P_{\text{нв}}$.

Для практических целей уравнение (14) может быть представлено в виде графиков, что наиболее рационально проводить в плоскости параметров $L_K - A$ при определенном сочетании параметров $P_{вх}$, $i_{вх}$, $h_1(\bar{x})$, $\beta(\bar{x})$, $K_{вх}$, k_1 , $K_{вых}$. Такое графическое представление относится к каналам подобной геометрии [$\beta(\bar{x})$ idem] с различным расположением раздающего коллектора: полу-плоскость $A > 0$ соответствует нижнему расположению раздающего коллектора, а $A < 0$ - верхнему.

Анализ системы (П) показывает, что в общем случае прямое определение границ устойчивости в плоскости $L_K - A$ невозможно. Поэтому границы устойчивости предварительно отыскивались методом "Д-разбиения" плоскости действительных параметров $B - K_{вх}$, линейно входящих в уравнение (12). При этом комплекс $\beta = \frac{\delta^2 \Delta \delta^2}{A}$ косвенно отражает влияние $\Delta P_{нпв}$, а $K_{вх}$ - влияние входного дросселирования.

Для проведения "Д-разбиения" система (П) преобразуется следующей подстановкой:

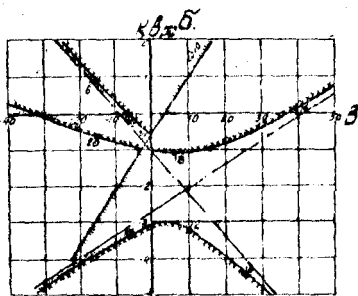
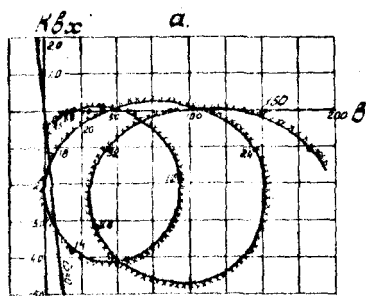
$$\tilde{f} = j\tilde{\omega}; \quad \delta\tilde{G} = \delta\tilde{G}_1 + j\delta\tilde{G}_2; \quad \delta\tilde{i} = \delta\tilde{i}_1 + j\delta\tilde{i}_2 \quad (15)$$

в результате которой уравнения (10) и (11) преобразуются в систему четырех уравнений, интегрирование которой позволяет отыскать значения $\delta\tilde{G}_1$, $\delta\tilde{G}_2$, $\delta\tilde{i}_1$, $\delta\tilde{i}_2$ как функций от \tilde{x} , а уравнение (12) дает систему двух уравнений для определения B и $K_{вх}$. Полнотой кривая "Д-разбиения" определяется при изменении значения $\tilde{\omega}$ от нуля до ∞ , но на практике достаточно ограничиться каким-то верхним пределом порядка $\tilde{\omega} = 50+100$.

При проведении "Д-разбиения" имеют место особые случаи, важнейшим из которых является случай особой прямой $\tilde{\omega} = 0$, соответствующий границе апериодической неустойчивости. После проведения "Д-разбиения" отыскивается область устойчивости с применением известного "правила штриховки".

На рис.1 приведены примеры "Д-разбиений" плоскости параметров $B - K_{вх}$ для одноходовых (а) и двухходовых (б) каналов при $P_{вх} = 250$ ата, $i_{вх} = 200$ ккал/кгс, $L_K = 700$ ккал/кгс, $h_1(\bar{x}) = 1,0$, $k_1 = K_{вых} = 0$.

Получив серию областей устойчивости в плоскости параметров $B - K_{вх}$ при одинаковых значениях $P_{вх}$, $i_{вх}$, $h_1(\bar{x})$, $\beta(\bar{x})$,



————— граница аperiodической неустойчивости
 - - - - - граница колебательной неустойчивости,
 * * * * * цифры у точек указывают значение δ

Рис. 1

K_1 , $K_{вх}$ и ряде значений L_K , представляется возможным построение искомым границ устойчивости в плоскости параметров $L_K - A$. Следует отметить, что возможно прямое построение границ аperiodической неустойчивости в плоскости $L_K - A$ по следующему уравнению:

$$A = - \frac{\delta^2 \cdot (\Delta L)^2 \cdot F_1(0)}{K_{вх} + K_{вх} \cdot \Phi_1(0) + K_1 \cdot \Phi_2(0) + \Phi_3(0)} \quad (16)$$

В диссертации рассмотрены вопросы практической реализации основных этапов разработанной методики и дается ряд рекомендаций по оптимизации выполнения отдельных этапов. Практическая реализация данной методики требует в общем случае применения ЭВМ и апробировалась на ЭЦВМ "Урал-2", "Микон-22".

В частном случае постоянного обогрева по длине канала возможно аналитическое интегрирование системы уравнений (I0), (II), которое дает выражение для $\delta \tilde{I}$ и $\delta \tilde{G}$ в следующем виде:

$$\delta \tilde{I} = C_1 \int_0^{\tilde{x}} \exp(-\tilde{S} \tilde{B}_3 \tilde{x}) d\tilde{x} \quad (17)$$

$$\delta \tilde{G} = \exp(-\tilde{S} \tilde{B}_3 \tilde{x}) + \frac{\tilde{S}}{\tilde{B}_1} \int_0^{\tilde{x}} \exp(-\tilde{S} \tilde{B}_3 \tilde{x}) \quad (18)$$

где $\beta_3 = \frac{\bar{\gamma}(x)}{\gamma_0}$, $\bar{\gamma}(x)$ - среднеинтегральный удельный вес на участке от 0 до 1.

Численные методы в данном случае используются только при вычислении определенных интегралов, входящих в уравнение кривой "д-разбоя", а уравнение (16) можно вообще записать в аналитическом виде.

Например, для вертикальных многоходовых каналов, состоящих из N -ходов, имеем:

$$A = - \frac{\gamma_0 \cdot (\Delta i)^2 \cdot \frac{1}{N} (\Delta \bar{\gamma} - \Delta \gamma)}{K_{вх} + K_{вых} \left[2 \frac{v_k}{v_0} - \left(\frac{\partial v}{\partial i} \right)_k \cdot \frac{\Delta i}{v_0} \right] + K_1 \left[2 \frac{v_k}{v_0} - \left(\frac{\partial v}{\partial i} \right)_k \cdot \frac{\Delta i}{v_0} - 2 \right] + \frac{3\bar{v} - v_k}{v_0}} \quad (19)$$

где

$$\Delta \bar{\gamma} = \sum_{n=1}^N (-1)^{n+1} \bar{\gamma}_n; \quad \Delta \gamma = 2 \sum_{n=1}^{N-1} (-1)^n \cdot n \gamma_n + (-1)^N \cdot N \cdot \gamma_N;$$

$\bar{\gamma}_n$ - значение $\bar{\gamma}$ на n -участке;

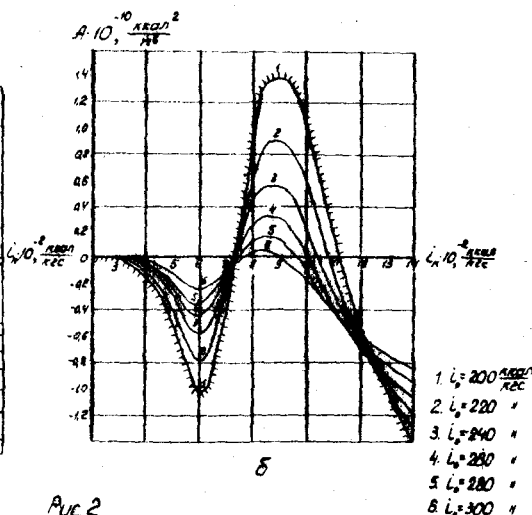
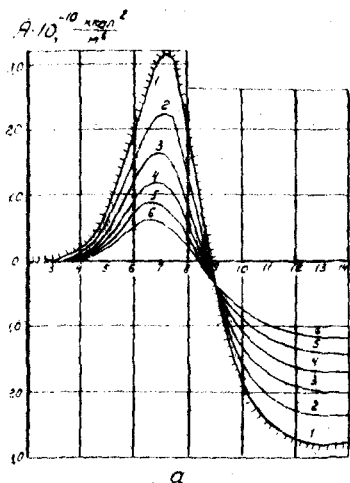
γ_n - значение γ в конце n -участка.

Нужно отметить, что уравнения (16), (19) могут быть получены путём приравнивания нулю значения производной от перепада давлений на канале по выходной энтальпии, что доказывает совпадение границ аperiodической неустойчивости с экстремумами гидравлических характеристик.

На основе использования описанной методики были проведены многовариантные расчеты, позволяющие провести анализ влияния основных конструктивных и режимных факторов на границы устойчивости. Особенно подробно были проанализированы границы аperiodической неустойчивости, построенные в виде номограмм для равномерно обогреваемых каналов горизонтальных и вертикальных многоходовых с числом ходов от одного до десяти при значениях $P_{вх}$, равных 230, 250, 300, 350 ата и значениях $i_{вх}$ от 200 до 600 ккал/кгс. По результатам расчетов были построены номограммы для использования в практических целях.

На рис.2 в качестве примера приведены границы аperiodической неустойчивости для двухходовых (а) и трехходовых (б) каналов при $P_{вх} = 350$ ата, $i_{вх} = (200+300)$ ккал/кгс, $h_1(\bar{x}) = 1$, $K_{вх} = K_1 = K_{вых} = 0$

Анализ результатов расчетов показал, что колебательная неус-



тойчивость для обогреваемых элементов парогенераторов СКД не является лимитирующим фактором, так как может наблюдаться только при приращениях энтальпий, значительно превышающих реальные. В то же время, аperiodическая неустойчивость в ряде случаев может иметь место даже при малых значениях Δt .

Весьма существенное влияние на границы устойчивости оказывает компоновка канала. Так, вертикальные многоходовые каналы с нижним расположением собирающего коллектора характерны значительной областью аperiodической неустойчивости как при четном, так и при нечетном числе ходов. Для таких же каналов с верхним собирающим коллектором область аperiodической неустойчивости весьма невелика, что позволяет рекомендовать их применение без особых ограничений. При увеличении числа ходов характер границ устойчивости усложняется.

Стабилизирующее влияние на границы устойчивости как аperiodической, так и колебательной оказывает увеличение значений ρ_{Bx} и особенно ζ_{Bx} . Аналогичное влияние имеет и входное дросселирование, но для вертикальных каналов в ряде случаев его эффективность сравнительно невелика. В этом случае для обеспечения устойчивости следует рекомендовать выбор правильного сочетания конструктивных и режимных параметров, например, рациональный

выбор компоновки при заданных значениях режимных параметров.

Влияние выходного дросселирования и потерь напора на ускорение по длине канала носит неоднозначный характер, но при параметрах, характерных для радиационных поверхностей нагрева парогенераторов, указанные факторы оказывают в большинстве случаев дестабилизирующее влияние на границы устойчивости.

IV. ИССЛЕДОВАНИЕ ВОПРОСОВ СТАТИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА ОБОГРЕВАЕМЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПРИ СВЕРХКРИТИЧЕСКИХ ДАВЛЕНИЯХ

Уравнение для перепада давлений ΔP на обогреваемом канале, записываемое в общем виде

$$\Delta P = P_{вх} - P_{вых} = \sum \Delta P_{МС} + \Delta P_{уск} + \Delta P_{тр} + \Delta P_{нив} \quad (20)$$

может быть преобразовано к следующему виду, используемому при дальнейшем исследовании:

$$\frac{\Delta P}{L} = |A| \cdot \Phi_4(l_k) + \operatorname{sign}(\cos \alpha^*) \cdot F_2(l_k) \quad (21)$$

где $\Delta P_{МС}$ - потери напора на местных сопротивлениях;
 $\Delta P_{уск}$ - потери напора на ускорение по длине канала;
 $\Delta P_{тр}$ - потери напора на трение;
 $\Delta P_{нив}$ - нивелирный напор;

$$\Phi_4(l_k) = \frac{K_{вх}}{2} \Phi_5(l_k) + \Phi_6(l_k) \cdot K_{вых} + K_1 \Phi_7(l_k) + \Phi_8(l_k);$$

$$\Phi_5(l_k) = \frac{V_0}{(\Delta l)^2}; \quad \Phi_6(l_k) = \frac{V_k}{(\Delta l)^2}; \quad \Phi_7(l_k) = \frac{V_k - V_0}{(\Delta l)^2}; \quad \Phi_8(l_k) = \frac{\int_0^l v d\tilde{x}}{(\Delta l)^2}$$

$$F_2(l_k) = \int_0^l \beta(\tilde{x}) \gamma d\tilde{x}$$

Отдельные слагаемые, входящие в $\Phi_4(l_k)$, соответствуют определенным составляющим перепада давлений, кроме $\Delta P_{нив}$. При этом каждая из составляющих ΔP может быть представлена в виде произведения комплексов, определяемых конструктивными параметрами канала и значением тепловосприятия и функций, зависящих только от режимных параметров $P_{вх}$, $l_{вх}$, l_k , $n_1(\tilde{x})$.

Так, для ΔP_{TP} при $h_1(\bar{x})$ можно записать:

$$\frac{\Delta P_{TP}}{L} = |A| \cdot \Phi_0(l_k) = |A| \cdot \frac{V}{(\Delta l)^2} \quad (22)$$

Предлагаемая форма записи уравнения для ΔP в виде (21) позволяет усовершенствовать проведение расчетов путем применения номограмм или таблиц для определения функций $\Phi_j(l_k)$ и $F_2(l_k)$ ($j = 5, 6, 7, 8$), что значительно сокращает объем вычислений. Номограммы для определения $\Phi_j(l_k)$ представляют собой семейство кривых $l_0 = \text{const}$ в плоскости $l_k - \Phi_j(l_k)$, а для $F_2(l_k)$ - кривые $l_0 = \text{const}$ в плоскости $l_k - F_2(l_k)$ при $P_{8x} = \text{const}$.

Были рассчитаны и построены номограммы для определения $\Phi_j(l_k)$ при l_0 от 0 до 800 ккал/кгс и номограммы для $F_2(l_k)$ типовых компоновок элемента (вертикальные элементы с числом ходов от одного до десяти), l_0 от 200 до 600 ккал/кгс. В обоих случаях значение давления составляет 230, 250, 300 и 350 ата.

На основании уравнения (21) возможно проведение в общем виде анализа влияния отдельных составляющих перепада давлений на стабильность гидравлической характеристики. При этом в качестве критерия стабилизирующего влияния принималось условие - отрицательность значения производной $\frac{\partial \Delta P}{\partial l_k}$, что при данной форме записи тождественно условию

$$\frac{\partial \Phi_j(l_k)}{\partial l_k} < 0; \quad \text{sign}(\cos \alpha) \cdot \frac{\partial F_2(l_k)}{\partial l_k} < 0 \quad (23)$$

Для выделения областей стабилизирующего влияния каждой составляющей перепада давлений были построены граничные кривые

$$\frac{\partial \Phi_j(l_k)}{\partial l_k} = 0; \quad \frac{\partial F_2(l_k)}{\partial l_k} = 0 \quad (24)$$

в плоскости параметров $l_0 - l_k$ при известных P_{8x} , $h_1(\bar{x})$, а для $F_2(l_k)$ еще и $\beta(\bar{x})$.

Анализ этих граничных кривых показал, что влияние всех составляющих перепада давлений, кроме входного дросселирования, имеет неоднозначный характер, зависящий от сочетания параметров P_{8x} , l_{8x} , l_k , а для $F_2(l_k)$ еще и $\beta(\bar{x})$. В частнос-

ти, $\Delta P_{\text{выл}}$ и особенно $\Delta P_{\text{уск}}$ при малых значениях $l_{\text{г}}$ (менее 300 ккал/кгс) имеют широкую область дестабилизирующего влияния, которая значительно сокращается при увеличении $l_{\text{г}}$ и при превышении определенного значения $l_{\text{г}}$, зависящего от $P_{\text{вх}}$, вообще исчезает. Подобный же характер носит и влияние $\Delta P_{\text{тр}}$, однако область его дестабилизирующего влияния значительно меньше, чем для $\Delta P_{\text{выл}}$ и $\Delta P_{\text{уск}}$.

Характер влияния $\Delta P_{\text{нив}}$ на стабильность гидравлической характеристики в значительной степени зависит от типа компоновки канала. Так, для вертикальных каналов с первым подъемным ходом при нечетном числе ходов это влияние носит преимущественно стабилизирующий характер, а при четном числе ходов — дестабилизирующий.

Дифференцирование уравнения (21) по l_k с приравниванием полученной производной $\partial(\sigma\%)/\partial l_k$ нулю дает уравнение для границ аperiodической неустойчивости в следующем общем виде:

$$A = - \frac{\partial F_2(l_k) / \partial l_k}{\partial \Phi_4(l_k) / \partial l_k} \quad (25)$$

которое путем преобразований можно привести к виду (16).

Физический смысл уравнения (25) состоит в том, что комплекс A имеет такое значение, при котором дестабилизирующее влияние $F_2(l_k)$ сводится к нулю стабилизирующим влиянием $\Phi_4(l_k)$ (может иметь место и обратный случай).

Для некоторых типов негоризонтальных компоновок элемента нарушение аperiodической устойчивости сопровождается изменением направления ("опрокидыванием") движения среды в отдельных каналах элемента. При исследовании данного явления рассматриваются следующие вопросы:

- а) определение типов компоновок, при которых возможно "опрокидывание";
- б) выделение областей параметров каналов с прямым движением среды, при которых возможно наличие "опрокинутого" движения в отдельных каналах;
- в) разработка методики построения ветвей гидравлических характеристик в области отрицательных расходов среды.

Все перечисленные вопросы решаются на основе совместного рас-

смотрения уравнений для перепада давлений в виде (21) для каналов с "прямым" и "опрокинутым" движением среды при обычных в решении подобных задач допущениях.

Необходимое условие для возникновения опрокидывания найдено в общем виде и для вертикальных многоходовых каналов состоит в верхнем расположении раздающего коллектора как при четном, так и при нечетном числе ходов. При нижнем расположении раздающего коллектора "опрокидывание" в таких элементах невозможно, что показывает ошибочность выводов целого ряда работ. Полученный вывод справедлив только для случая ОКД.

Выделение областей параметров прямого движения, при которых возможно наличие "опрокинутого" движения в отдельных каналах, проводится в плоскости $i_k - A$ по специальной методике, имеющей существенное различие для случаев каналов с четным и нечетным числом ходов. Для каналов с нечетным числом ходов искомая область параметров ограничена границей аperiодической неустойчивости и кривой $\frac{\Delta P}{L} = 0$, а для каналов с четным числом ходов несколько шире и частично лежит в области $\Delta P > 0$.

Для построения ветвей гидравлических характеристик в области отрицательных расходов среды предложены номограммы, представляющие собой семейство кривых $i_{крp} = const$ в плоскости параметров $i_{кробр} - |A|$, построенных при $P = const$. При этом предполагается предварительное построение гидравлической характеристики в области положительных расходов среды.

Для комплексной оценки теплогидравлической надежности предлагается так называемая "обобщенная гидродинамическая диаграмма", представляющая собой границы аperiодической и колебательной неустойчивости в плоскости параметров $i_k - A$, дополненные кривыми $\frac{\Delta P}{L} = const$, отражающими условие совместной работы систем параллельных каналов одинаковой длины. Уравнение кривых $\frac{\Delta P}{L} = const$ преобразуется из (21) и имеет вид

$$A = \frac{\text{sign}(\cos \delta^*) \frac{\Delta P}{L}}{\Phi_4(i_k)} = \frac{F_2(i_k)}{\Phi_4(i_k)} \quad (26)$$

На рис.3 приведена обобщенная гидродинамическая диаграмма для двухходовых каналов при $P_{\delta x} = 250$ ата, $i_{\delta x} = 200$ ккал/кгс, $n_1 \bar{x}_1 = 1$, $K_{\delta r} = K_1 = K_{\delta см} = 0$.

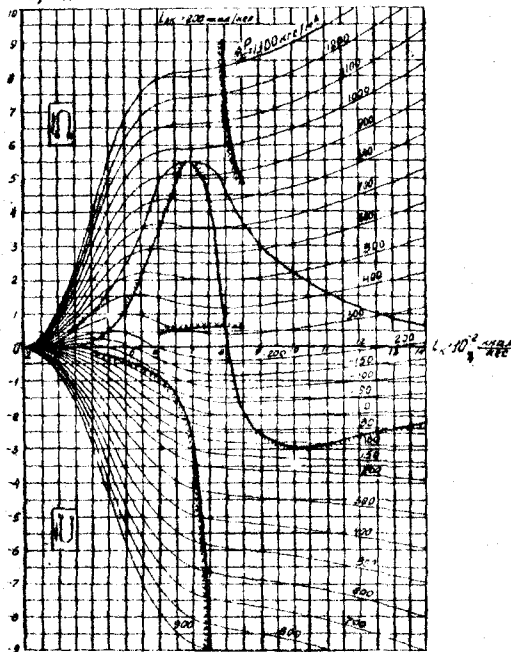


Рис 3

Совместное рассмотрение границ устойчивости с кривыми $\Delta P/L = const$ позволяет сделать вывод, что наименьшим запасом устойчивости всегда обладает канал с наибольшим обогревом.

В УралВТИ к настоящему времени разработан ряд программ для расчета отдельных компонентов "обобщенной гидродинамической диаграммы" на ЭВМ "Минск-22".

Обобщенная гидродинамическая диаграмма строится одновременно для геометрически подобных каналов с различным расположением раздающего коллектора при минимальном числе фиксированных параметров ($Re_x, L_{ex}, h, (\bar{\chi}), \beta(\bar{\chi}), K_{ex}, K_c, K_{вых}$) и позволяет решать целый ряд частных задач гидравлического расчета, например, строить гидравлические и разверочные характеристики.

В общем виде проведен качественный анализ чувствительности параметров процесса в обогреваемом канале к двум видам внешних статических возмущений: перепада давлений и тепловосприятия. При анализе приняты в качестве критериев чувствительности:

а) к возмущениям перепада давлений—относительная крутизна гидравлической характеристики

$$C = \left(\frac{\partial \Delta P}{\partial G} \right)_e \cdot \frac{G_e}{\Delta P_e} \quad (27)$$

б) к возмущениям тепловосприятия—крутизна разверочной характеристики $\beta_T = f(h_T)$ в точке $\eta_T = \beta_T = 1,0$

$$Q = \left(\frac{\partial \beta_T}{\partial h_T} \right)_{\eta_T = \beta_T = 1,0} \quad (28)$$

Аналитически показано, что высокую чувствительность параметров процесса к указанным видам внешних статических возмущений можно рассматривать как следствие малого запаса по апериодической устойчивости.

У. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ С УЧЕТОМ НЕСТАЦИОНАРНОЙ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ СТЕНКИ КАНАЛА И ПЕРЕМЕННОСТИ КОЭФФИЦИЕНТА ПУТЕВЫХ ПОТЕРЬ

В основе методики исследования устойчивости процесса с использованием математической модели в виде системы (I) лежат те же общие принципы, что и в описанных выше методиках, но применение более совершенной математической модели вызывает определенные отличия и в методике исследования.

При использовании в качестве исходной модели системы (I) приходится фиксировать большее число параметров, чем при решении по упрощенной модели, а именно:

- а) конструктивные параметры: наружный D и внутренний d диаметры; материал стенки и её шероховатость $k_{эф}$; геометрию канала в виде $\cos \alpha(\bar{x})$ и его длину L ; значения $\zeta_{вх}$ и $\zeta_{вых}$;
- б) режимные параметры: $\rho_{вх}$, $i_{вх}$, i_k , Q , $h_1(\bar{x})$.

При проведении статического расчета определяется не только распределение по длине канала энтальпии среды i , но и значения $\zeta_{ст\ вх}$. Распределение энтальпии i по длине канала определяется, как и предыдущем случае, по уравнению

$$i = i_0 + \Delta i \cdot h_2(\bar{x}) = i_0 + \Delta i \int_0^{\bar{x}} h_1(\bar{x}) d\bar{x} \quad (29)$$

При расчете $t_{ст\text{вн}}$ используется уравнение (6), которое после несложных преобразований приводится к следующему виду:

$$K t_{ст} K_a^{0,1} (\Delta L)^{0,9} h_1(\bar{x}) - f_1(l) - f_2(l, t_{ст\text{вн}}) \quad (30)$$

где

$$K t_{ст} = 64,21 \frac{d^{0,9}}{L} (Q^*)^{0,1}, \text{ ккал}^{0,1} \cdot \text{м}^{1,4} \cdot \text{сек}^{-0,58};$$

$K_a = \frac{A}{Q^{0,1}} Q^*$ - какое-то произвольно выбранное, но фиксированное значение Q ккал/сек;

$$f_1(l) = \lambda^{0,34} \nu^{0,43} M^{-0,24}, \quad \frac{\text{ккал}^{0,34} \cdot \text{м}^{1,43}}{\text{кгс}^{0,67} \cdot \text{сек}^{0,58} \cdot \text{град}^{0,34}}$$

$$f_2(l, t_{ст\text{вн}}) = \bar{c}^{0,66} V_{ст\text{вн}}^{-0,43} (t_{ст\text{вн}} - t)^{\frac{\text{ккал}^{0,66} \cdot \text{град}^{0,34}}{\text{кгс}^{0,67} \cdot \text{м}^{1,43}}}$$

Расчет $t_{ст\text{вн}}$ проводится после определения $L(\bar{x})$ методом последовательных приближений по уравнению (30).

Определенный практический интерес представляет графическая интерпретация уравнения (30) в плоскости параметров $t_{ст\text{вн}} - f_1(l) \times f_2(l, t_{ст\text{вн}})$, имеющая вид семейства кривых $\bar{c} = \text{const}$ при $P = \text{const}$ и позволяющая довольно просто определять значение $t_{ст\text{вн}}$ при известных параметрах, входящих в левую часть уравнения (30).

Построение границ устойчивости целесообразно проводить в плоскости параметров $\bar{c} - Q$. Так как прямое построение в этой плоскости невозможно, то его приходится проводить косвенным путем, предварительно отмокая границы устойчивости в плоскости других параметров.

Для определения границ устойчивости исходная система уравнений (1) линеаризуется и, после применения преобразования Лапласа, может быть приведена к системе трех уравнений, аналогично системе (П), с теми же граничными условиями. Характерным отличием полученной системы является зависимость ряда переменных коэффициентов не только от L , но и от $t_{ст\text{вн}}$ и \bar{S} , что объясняется учетом нестационарных процессов в стенке канала и переменности $\lambda_{тр}$.

Границы устойчивости определяются методом "д-разбиения" плоскости параметров $Z_1 - Z_2$, линейно входящих в линеаризованное

уравнение количества движений ($Z_1 = K_{Вк} - Z_1 K_1$; $Z_2 = K_{Вк} + K_1$). При этом к линеаризованной системе уравнений применяется подстановка (15), в результате которой комплексную форму приобретают не только значения δG , δi , $\phi_j(\bar{S})$, $F_j(\bar{S})$, но и переменные коэффициенты, зависящие от S .

Определив методом "д-разбиения" серию областей устойчивости в плоскости параметров $Z_1 - Z_2$ при различных значениях K_q и фиксированных значениях прочих параметров, представляется возможным построить границу устойчивости в плоскости $K_q - Z_1$, соответствующую заданному значению Z_2 .

Проведя такое построение для ряда значений Z_2 , можно получить искомую границу устойчивости в плоскости параметров $K_q - Z_1$ при заданном значении Z_2 .

При исследовании вопросов статической устойчивости используется уравнение (3), которое для случая стационарного режима может быть записано в следующем виде:

$$\Delta P = L \left\{ \Delta P_{тр}^* K_q^2 \left[\left(\frac{K_{Вк}}{2} + K_1 \right) + (K_{Вк} - K_1) \beta_{Вк} + \right. \right. \quad (32)$$

$$\left. \left. + \int_0^l [a, b, d \bar{x}] + \text{sign}(\cos \alpha^*) \cdot \gamma_0 \cdot \int_0^l \beta(\bar{x}) \frac{1}{\delta_i} d \bar{x} \right\}$$

$$\Delta P_{тр}^* = \frac{\lambda_{тр}^* \cdot L \cdot (G)^2 \left[\frac{V_0}{(\lambda)^2} \right]_{\frac{K_2 c}{M^2}}}{2 g d f^2} ; K_{Вк} = \frac{2 \rho \delta_1}{\lambda_{тр}^* 4 d}$$

$$K_{Вк} = \frac{2 \rho \delta_1}{\lambda_{тр}^* 4 d} ; K_1 = \frac{2}{\lambda_{тр}^* 4 d} ; a_1 = \frac{\lambda_{тр}^*}{\lambda_{тр}^*}$$

$\lambda_{тр}^*$ - произвольно выбранное, но фиксированное значение $\lambda_{тр}$.

По выражению (32) можно построить графическую зависимость $\Delta P = f(i_{к}, K_q)$ для данного канала в виде семейства кривых $i_{к} = \text{const}$ на плоскости параметров $K_q - \Delta P$. При этом для каждого сочетания $i_{к} = K_q$ необходимо определять распределение значений a и $\beta_{Вк}$ по длине канала. Кривые $i_{к} = \text{const}$ по своему характеру близки к квадратичным параболом и отличаются от них только за счет члена $\int_0^l [a, b, d \bar{x}]$, учитывающего переменность коэффициентов путевых потерь $\lambda_{тр}$.

Графическая зависимость $\Delta P = f(i_{к}, K_q)$ позволяет относительно просто построить гидравлические характеристики $\Delta P = f(G)$ и раз-

верочные в виде $p_r = f(h_r)$ или $p_r = f(\dot{m}_r)$.

Зависимость (32) может использоваться при обработке данных промышленных и экспериментальных исследований для определения распределения параметров по отдельным каналам обогреваемого элемента. Для этой цели применяется графическое изображение уравнения (32) в плоскости $K_q - \Delta P$, которое строится для каждого канала при известных из эксперимента значениях P_{B1} , L_{B1} , c_k и позволяет при определенном значении ΔP отыскивать величину K_q , а затем тепловосприятия и расхода.

Предложенные в настоящей главе методики исследования требуют значительных затрат счетного времени и предполагают обязательное использование ЭВМ. Преимущества этих методик в смысле точности по сравнению с упрощенными в наибольшей степени проявляются в тех случаях, когда зоне высоких теплоемкостей среды соответствуют высокие значения удельных тепловых потоков. В остальных случаях большего выигрыша в точности ожидать не следует и можно ограничиться упрощенными методиками, описанными выше.

У1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГРАНИЦ АПЕРИОДИЧЕСКОЙ НЕУСТОЙЧИВОСТИ

Расчетный анализ границ устойчивости показал, что в большинстве случаев для обогреваемых элементов при сверхкритических давлениях лимитирующей оказывается аперiodическая неустойчивость. Поэтому при проведении эксперимента было решено ограничиться опытной проверкой расчетно-теоретической методики определения границ аперiodической неустойчивости. Такая постановка задачи существенно отличается от проведенных ранее работ, где были исследованы общие вопросы гидродинамики обогреваемых элементов с многозначной гидравлической характеристикой, и позволяет значительно сократить по сравнению с указанными работами необходимый объем эксперимента.

Эксперимент проводился на гидродинамическом стенде УралВТИ, выполненном на прямоточной схеме. Экспериментальный участок имел компоновку, близкую к П-образной, и представлял собой трубу X18H10T диаметром 16x3 мм, длиной около 10 м. Гидравлическая характеристика канала такой компоновки в широком диапазоне изменения параметров является многозначной, то есть имеет область аперiodической неустойчивости.

Условие работы исследуемого канала в системе параллельных каналов моделировалось параллельным включением необогреваемого шунта 32x6 мм, имеющего регулирующий вентиль, причем отношение расходов через шунт и канал поддерживалось при эксперименте близким к 10:1. Экспериментальный участок обогревался прямым электрообогревом по трехконтактной схеме, что позволило отключаться от электроизолирующих фланцев. Электрическая схема позволяла плавно регулировать выделяемую на участке мощность от нуля до 80

Схема теплотехнических измерений обеспечивала контроль необходимых режимных параметров с регистрацией параметров, характеризующих устойчивость режима: расход на входе канала $G_{вх}$ и температура на выходе $t_{вых}$. Анализ погрешностей измерений показал их удовлетворительную точность.

Эксперимент проводился двумя сериями опытов. Опыты первой, предварительной серии были наладочными и тарировочными.

Опыты второй, основной серии проводились при давлениях 180 и 240 ата, выходной энтальпии в диапазоне (210+220)ккал/кгс. Целью опытов при давлении 180 ата являлось определение возможности применения разработанных методов расчета при сверхвысоких докритических давлениях.

Методика проведения опытов заключалась в постепенном ступенчатом повышении выделяемой на канале мощности при постоянном перепаде давлений до возникновения аperiodической неустойчивых режимов, которые фиксировались по резкому увеличению температуры среды на выходе канала и падению почти до нуля расхода среды. При этом за режим, соответствующий границе аperiodической неустойчивости, с некоторым приближением принимался последний устойчивый режим. При возникновении аperiodической неустойчивости проводилось отключение электрообогрева.

Проведение опытов при постоянном перепаде давлений позволило одновременно проверить совпадение эксперимента с расчетом по кривым $\Delta P - const$.

Результаты эксперимента сравнивались с расчетными границами аperiodической неустойчивости и кривыми $\Delta P - const$, построенными в плоскости параметров $t_c - G$. Необходимые расчеты выпол-

нидифь на ЭВМ "Минск-22". Расчеты для $P=180$ ата проводились при допущении о гомогенности среды.

Сравнение данных эксперимента с расчетом показало их удовлетворительное совпадение: расхождение данных по границам аperiodической неустойчивости не превышало 10%, а по кривым $\Delta P = const$ - 30%. Повышенное расхождение по кривым $\Delta P = const$ в первую очередь объясняется тем, что по мере приближения режима к границе аperiodической неустойчивости наблюдалось некоторое увеличение перепада давлений, вносящее определенную систематическую погрешность. В то же время, это явление не оказывает никакого влияния на положение границ аperiodической неустойчивости, достижение которых может проводиться различными методами.

На рис.4 приведено сопоставление результатов эксперимента с теоретическими границами аperiodической неустойчивости при $P = 180$ и 240 ата.

Совпадение данных эксперимента с расчетом было примерно одинаковым при давлениях 180 и 240 ата, что показывает возможность экстраполяции разработанных расчетно-теоретических методик на область сверхвысоких докритических давлений.

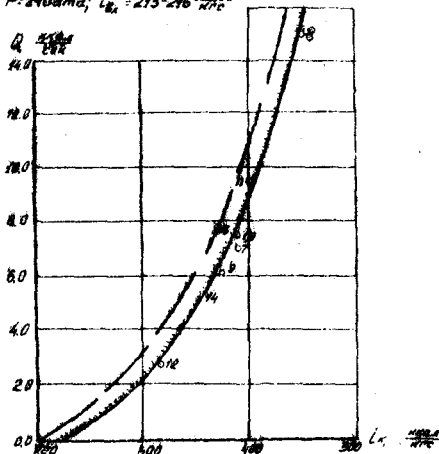
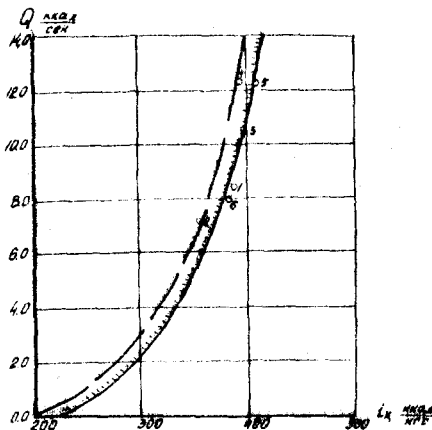
Эксперименты показали возможность устойчивой работы в области многозначности на ветвях гидравлической характеристики с положительной крутизной ($\frac{d\Delta P}{dG} > 0$) при отсутствии динамических возмущений, что совпадает с данными других авторов. В то же время, режимы, соответствующие аperiodически неустойчивым ветвям гидравлических характеристик ($\frac{d\Delta P}{dG} < 0$), зафиксированы не были. Это показывает невозможность реализации таких режимов при достаточно большом числе параллельных каналов в элементе.

Во всем диапазоне изменения режимных параметров пульсационных режимов зафиксировано не было, что согласуется с данными расчета границ колебательной неустойчивости для каналов такой компоновки.

Таким образом, сравнение экспериментальных данных с расчетными позволяет сделать вывод о правомерности разработанных расчетно-теоретических методик и возможности их применения в практике гидравлических расчетов.

а) $P=180 \text{ атм}$; $l_k = 218-220 \frac{\text{мм}}{\text{мм}}$

б) $P=240 \text{ атм}$; $l_k = 213-216 \frac{\text{мм}}{\text{мм}}$



Условные обозначения:
 ———— расчетная граница аperiodической неустойчивости при $l_k = 220 \frac{\text{мм}}{\text{мм}}$
 - - - - - расчетная граница aperiodической неустойчивости при $l_k = 200 \frac{\text{мм}}{\text{мм}}$
 об - последняя точка опыта, соответствующая устойчивому режиму

Рис. 4

В В В О Д Ы

1. Проведен критический анализ современного состояния вопроса, показывающий необходимость проведения дальнейших исследований и конкретизирующий их направление.

2. Предлагаются две математические модели процесса в обогреваемых элементах при СКД, различающиеся своим совершенством. Выбор модели при теоретическом исследовании во многом определяется областью применения конечных результатов.

3. Разработаны инженерные методики определения границ устойчивости процесса в единичном обогреваемом канале, работающем в системе параллельных каналов. Решение задачи в общем случае ведется численными методами и требует применения ЭВМ. Конечные ре-

зультаты исследования представляются в довольно общем виде и могут быть номографированы. Рассмотрены основные вопросы практической реализации методики расчета границ устойчивости.

4. Дается анализ влияния основных конструктивных и режимных факторов на положение границ устойчивости применительно к наиболее характерным компоновкам обогреваемых элементов парогенераторов СКД. В частности показано, что для таких элементов колебательная неустойчивость не является лимитирующим фактором.

5. На основании предложенной усовершенствованной формы записи уравнения для перепада давлений на обогреваемом канале предлагаются специальные номограммы и таблицы для определения отдельных составляющих перепада давлений и проведен в общем виде анализ влияния последних на стабильность гидравлической характеристики канала.

6. Решается ряд вопросов, связанных с возможностью "опрокидывания" движения среды в отдельных каналах обогреваемых элементов.

7. Предлагается применение для комплексной оценки теплогидравлической надежности так называемой "обобщенной гидродинамической диаграммы", позволяющей также решать ряд частных задач гидравлического расчета.

8. Проведен качественный анализ явления высокой чувствительности параметров процесса к внешним статическим возмущениям. Аналитически показано, что указанные явления можно рассматривать как следствие малого запаса режима по аperiodической неустойчивости.

9. Предлагаются методики статического расчета и определения границ устойчивости с учетом нестационарной теплопроводности стенки канала и переменности коэффициента путейых потерь.

10. Проведена экспериментальная проверка расчетных границ аperiodической неустойчивости. Приемлемое совпадение результатов расчета с экспериментом подтверждает правомерность разработанной расчетно-теоретической методики определения границ аperiodической неустойчивости.

11. Результаты реферируемой диссертации могут быть использованы при разработке нормативных методов гидравлического расчета паровых котлов и использоваться на различных этапах разра-

ботки и наладки новых образцов парогенераторов. В настоящее время отдельные материалы реферруемой работы используются в ряде работ УралВТИ по гидродинамике парогенераторов в мощных энергоблоках 300 и 500 Мвт.

ОБОЗНАЧЕНИЯ

P - давление, кгс/м², t - температура °С; i - энтальпия, ккал/кгс; V - удельный объем, м³/кгс; γ - удельный вес, кгс/м³; ΔP - перепад давлений, кгс/м²; C_p - теплоемкость при постоянном давлении, ккал/кгс.град; λ - коэффициент теплопроводности, ккал/м.град.сек; μ - коэффициент динамической вязкости, кгс.м²/сек; α - коэффициент температуропроводности, м²/сек; X - координата, отсчитываемая по длине канала вдоль оси потока, м; L - полная длина канала, м; Z - текущий радиус, м; D и d - соответственно наружный и внутренний диаметр канала, м; f - площадь проходного сечения канала, м²; $P_{вн}$ - внутренний периметр канала, м; $\lambda_{тр}$ - коэффициент путевых потерь; $\lambda_0 f_{то}/d$ - приведенный коэффициент трения, м⁻¹; $k_{эф}$ - эффективная шероховатость трубы, м; ξ - коэффициент местного сопротивления; α - угол между осью X и вектором $-\vec{g}$; q - плотность теплового потока, ккал/м²сек; Q - полное тепловосприятие канала, ккал/сек; W - скорость, м/сек; G - весовой расход, кгс/сек; τ - время, сек; S - параметр преобразования Лапласа, сек⁻¹; δZ - возмущение параметра Z , преобразованное по Лапласу; $g = 9,815$ м/сек²; $i = \sqrt{-1}$; $sign$ - знак.

ИНДЕКСЫ

- v_x ; v_{yx} - относятся к параметрам во входном и выходном коллекторах соответственно;
- Q, K - относятся к параметрам в начале и в конце канала соответственно;
- st - относится к параметрам стенки канала;
- $st_{вн}$ - относится к параметрам, определяемым по температуре внутренней поверхности стенки канала;
- E - относится к параметрам на стационарном режиме.

Отдельные материалы диссертации докладывались на 3-й и 4-й Всесоюзных конференциях по теплообмену и гидравлическому сопротивлению в элементах энергетических машин и аппаратов (г. Ленинград, КТЦНИПИ им. Ползунова, апрель 1967 и январь 1971 г.), научно-техническом совещании по повышению надежности поверхностей нагрева парогенераторов сверхкритического давления (г. Москва, ЭГНИИ им. Кржижановского, апрель 1968 г.), конференции научных работников, посвященной 50-летию Советской власти (г. Челябинск, ВоФВТИ, 1967 г.), научной конференции Челябинского политехнического института (факультет ДПА, май 1968 г.).

Основные положения реферируемой диссертации опубликованы в следующих статьях:

1. ЛЕЛЯГИН И.П., ЧАКРЫГИН В.Г. "Определение границ аperiodической неустойчивости обогреваемых панелей прямоточных котлов при сверхкритических давлениях". Тезисы докладов 3-й Всесоюзной конференции по теплообмену и гидравлическому сопротивлению в элементах энергетических машин и аппаратов, Ленинград, ЦКТИ, апрель 1967.
2. ЛЕЛЯГИН И.П., ЧАКРЫГИН В.Г. "Определение границ аperiodической неустойчивости и построение гидродинамических характеристик панелей прямоточных котлов сверхкритического давления". В сборнике "доклады конференции научных работников, посвященной 50-летию Советской власти (секция энергетики, подсекция теплоэнергетики, под ред. Руковазова Б.П.) Челябинск, 1967.
3. ЛЕЛЯГИН И.П., ЧАКРЫГИН В.Г. "Определение границ неустойчивости рабочих процессов в панелях прямоточных котлов СКД". Тезисы докладов научно-технического совещания по повышению надежности испарительных и пароперегревательных поверхностей котлов сверхкритического давления", Москва, апрель, 1968.
4. ЛЕЛЯГИН И.П., ЧАКРЫГИН В.Г. "Определение границ аperiodической неустойчивости обогреваемых панелей прямоточных котлов при сверхкритических давлениях". "Теплоэнергетика", №11, 1968.
5. ЛЕЛЯГИН И.П., ЧАКРЫГИН В.Г. "Влияние отдельных составляющих перепада давлений на гидродинамику обогреваемых труб прямоточных котлов сверхкритического давления". "Теплоэнергетика", №2, 1970

6. ЛЕТЯГИН И.П., ЧАКРЫГИН В.Г. "Определение границ устойчивости в обогреваемых трубах при сверхкритических давлениях". Тезисы докладов IУ Всесоюзной конференции по теплообмену и гидравлическому сопротивлению при движении двухфазного потока в элементах энергетических машин и аппаратов". Ленинград, ЦКТИ, январь 1971.
7. ЛЕТЯГИН И.П., ЧАКРЫГИН В.Г. "Определение границ неустойчивости движения теплоносителя в обогреваемых трубах при сверхкритических давлениях". "Теплоэнергетика", №4, 1972.

Л е т я г и н Иван Павлович
ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКОЙ
НАДЕЖНОСТИ ОБОГРЕВАЕМЫХ ЭЛЕМЕНТОВ
ПАРОГЕНЕРАТОРОВ СВЕРХКРИТИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ

Техн. редактор ЗЕМЛЯНСКАЯ Л.Г.

ЛБ 14309. 23/УП-73 г. Сдано в печать 24/УП-73 г. Формат бумаги 60x90 1/16. Объем 2 п.л. Отпечатано на ротапринтере ЧПИ. Тираж 120 экз. Заказ № 212/774.