

## О стохастических принципах изучения гидродинамической неустойчивости парогенерирующих каналов реактора

Б. Н. СЕЛИВЕРСТОВ, П. А. ГАВРИЛОВ,  
Ю. М. БЫКОВ, Ю. Н. ШУИНОВ

УДК 621.039.514

Статистические флюктуации парообразования в активной зоне кипящего реактора в большинстве случаев определяют уровень устойчивой работы всей установки в целом. В связи с отсутствием каких-либо экспериментальных данных, устанавливающих соответствие характера флюктуаций паросодержания теплофизическим параметрам процесса парообразования, нет уверенности в правильности результатов математического моделирования технологических процессов при исследовании запаса устойчивости кипящих реакторов.

В настоящей работе делается попытка изучить спектр шума паросодержания и закономерность его деформации при изменении режима работы испарительных каналов от устойчивого к пульсационному.

Развитие полученных результатов позволит более целенаправленно подойти к изучению тонких эффектов механизма парообразования: уточнению математических моделей, построению некоторых эмпирических соотношений, связывающих статистические характеристики флюктуаций паросодержания с теплофизическими параметрами процесса парообразования.

**Описание экспериментальной установки и порядок проведения экспериментов.** Экспериментальные исследования проводились на теплотехническом стенде, принципиальная схема которого соответствовала технологической схеме второго блока Белоярской АЭС им. И. В. Курчатова [1]. Экспериментальные испарительные каналы были выполнены в натуральную величину и по термодинамическим и геометрическим характеристикам моделировали испарительные каналы реактора [2].

Истинное объемное паросодержание регистрировалось на выходе испарительного участка

после верхнего коллектора. Принцип действия измерителя основан на определении паросодержания паро-водяной смеси посредством измерения ее диэлектрической проницаемости радиоинтерференционным методом на коротких волнах [3]. Тарировка прибора проводилась в лабораторных условиях. Кроме общего расхода индивидуально регистрировались расходы теплоносителя в пучке парогенерирующих трубок, температура на входе в испарительный участок, перепад давления на испарительном участке, давление в верхнем коллекторе канала, электрическая мощность. Перечисленные параметры непрерывно регистрировались на шлейфовых осциллографах типа Н-700. Были определены амплитудно-фазо-частотные характеристики средств регистрации для коррекции полученных результатов.

Предварительно исследовалась устойчивость расхода теплоносителя в трубках испарительного канала в относительно широком диапазоне давлений, расходов, мощностей [2].

На рис. 1 изображены границы устойчивой работы трубок испарительного канала в пространстве технологических параметров: весовое паросодержание  $x$ , весовой расход  $G$ , электрическая мощность.

При экспериментировании устанавливалась такая совокупность технологических параметров стенда, при которой рабочая точка (например, точка 1 на рис. 1), характеризующая равновесное состояние стенда, была максимально удалена от границы неустойчивой работы канала. Затем при постоянных электрической мощности, давлении и расходе изменялась температура на входе в канал таким образом, чтобы рабочая точка мигрировала к границе устойчивости. После установления равновесного состоя-

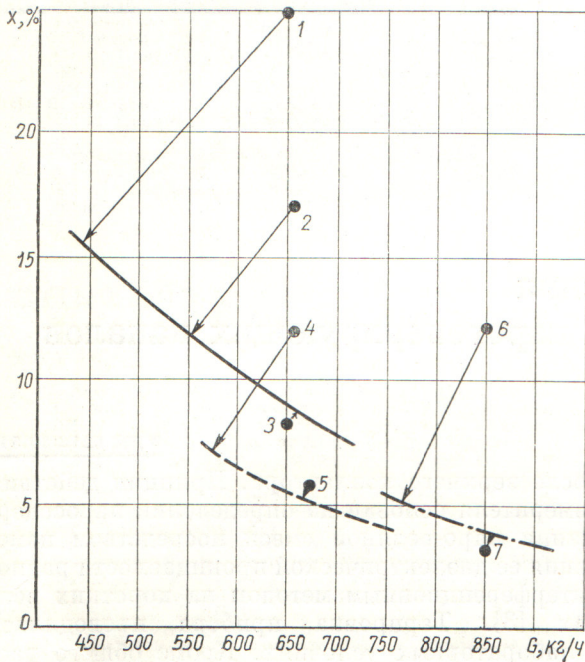


Рис. 1. Границы гидродинамической устойчивости и рабочие точки некоторых параметров испарительного канала при давлении 70 атм и мощности (квт): — 115; - - - - 95; - · - · - 80.

Блок А условно отражает динамику испарительного канала, выходом которого является объемное паросодержание  $\varphi(t)$ , изменяющееся в результате суперпозиции входных возмущений. Входными возмущениями являются мощность  $Q(t)$ , давление  $P(t)$ , расход теплоносителя  $G(t)$ , температура теплоносителя на входе  $T(t)$ , внутренняя аддитивная шумовая помеха  $f(t)$ , характеризующая статистическую природу парообразования в трубках испарительного канала. Блок В отражает динамику всего остального технологического оборудования стенда, включая теплообменные устройства, циркуляционный насос, соединительные магистрали. Здесь  $E(t)$  — всевозможные внешние возмущения со стороны «хвоста» стенда, включая флюктуации положения регулирующего

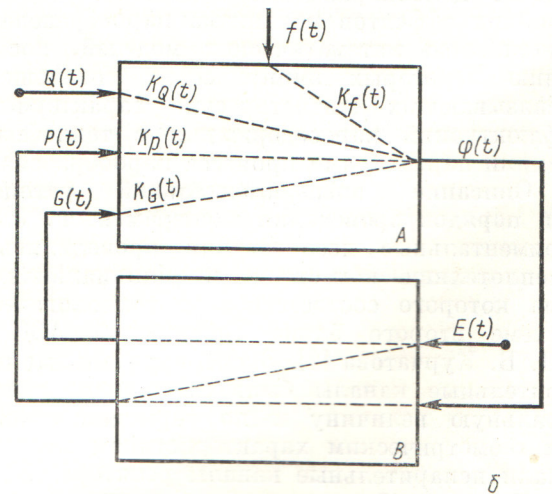
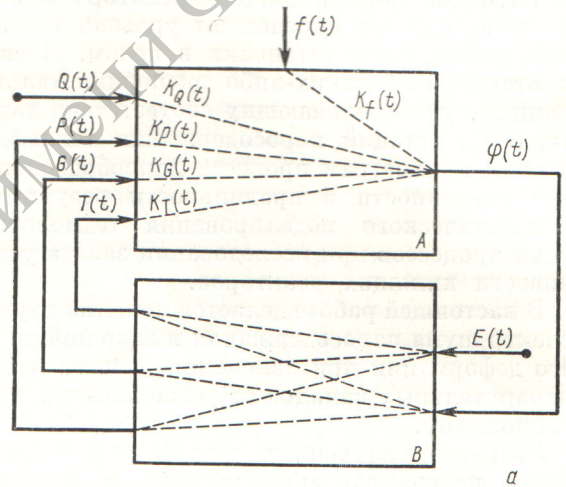


Рис. 2. Структурная схема динамических каналов теплотехнического стенда (а) и ее упрощенная схема (б).

ния в режиме нормальной эксплуатации непрерывно регистрировались все теплотехнические параметры. Для другой серии экспериментов изменялся расход при фиксированной электрической мощности, давлении и температуре на входе. Измерения в каждой серии опытов считались законченными, когда фиксировалась разгерметизация по шести трубкам испарительного канала, что соответствовало началу неустойчивой работы канала (например, точки 3, 7 на рис. 1). Время записи параметров для каждой рабочей точки составляло 5—7 мин. На рис. 1 приведена траектория изменений режимов работы испарительного канала для первой серии экспериментов.

Следует отметить, что вдали от границы устойчивости флюктуации давления и расхода теплоносителя незначительны. По мере приближения рабочей точки к границе флюктуации возрастали. Статистические характеристики отклонений электрической мощности оставались постоянными на протяжении всего периода экспериментирования.

На рис. 2, а изображена структурная схема теплотехнического стенда, приближенно отражающая физическую сущность и последовательность прохождения возмущающих сигналов.

клапана, температуры охлаждающей воды, полезного напора насоса и т. п.;  $K_Q(t)$ ,  $K_P(t)$ ,  $K_G(t)$ ,  $K_T(t)$  — импульсные переходные функции паросодержания  $\varphi(t)$  по каналам возмущения.

При экспериментировании было установлено, что вследствие значительной инерционности динамических каналов блока  $B$  флюктуации  $\varphi(t)$  не вызывают определенной реакции параметров  $G(t)$  и  $T(t)$ , а флюктуации  $E(t)$  не сказываются на параметре  $T(t)$ . Последнее позволило несколько упростить структурную схему, положив  $K_T(t) = 0$ .

Упрощенная структурная схема изображена на рис. 2, б.

Полученные реализации флюктуаций паросодержания  $\varphi(t)$  еще не позволяют сделать определенных выводов о статистической природе парообразования, поскольку сигнал  $\varphi(t)$ , помимо искомой помехи  $f(t)$ , содержит реакцию возмущающих воздействий  $Q(t)$ ,  $P(t)$  и  $G(t)$ . Поэтому, прежде чем перейти к выделению сигнала собственных шумов  $f(t)$  и анализа его характеристик в пространстве теплотехнических параметров, необходимо определить импульсные переходные функции  $K_Q(t)$ ,  $K_P(t)$ ,  $K_G(t)$ .

Располагая записями процессов  $Q(t)$ ,  $P(t)$ ,  $G(t)$ ,  $E(t)$ ,  $\varphi(t)$  для рассматриваемого объекта с тремя входами и одним выходом  $\varphi(t)$ , в силу суперпозиции можно записать \*

$$\begin{aligned} \varphi(t) = & \int_0^{\infty} Q(t-\Theta) K_Q(\Theta) d\Theta + \\ & + \int_0^{\infty} P(t-\Theta) K_P(\Theta) d\Theta + \\ & + \int_0^{\infty} G(t-\Theta) K_G(\Theta) d\Theta + \\ & + \int_0^{\infty} f(t-\Theta) K_f(\Theta) d\Theta. \end{aligned} \quad (1)$$

Умножая обе части равенства (1) поочередно на  $\frac{1}{T} Q(t-\tau)$ ,  $\frac{1}{T} E(t-\tau)$ ,  $\frac{1}{T} G(t-\tau)$  и интегрируя по  $\tau$ , можно получить систему трех

\* Делается предположение, что в диапазоне отклонений технологических параметров объект является линейным.

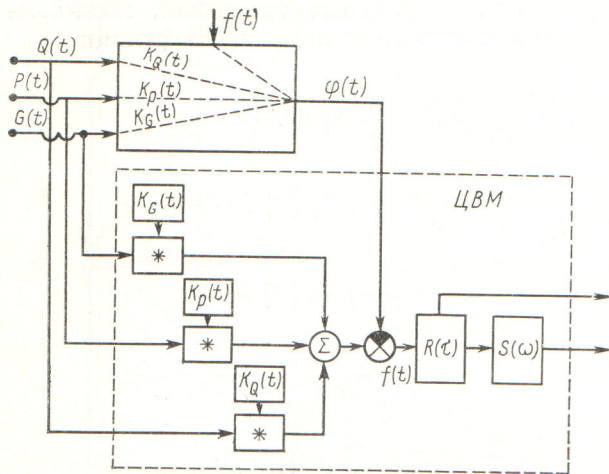
линейных интегральных уравнений, связывающих три импульсные переходные функции:

$$\begin{aligned} R_{\varphi Q}(\tau) = & \int_0^{\infty} R_Q(\tau-\Theta) K_Q(\Theta) d\Theta + \\ & + \int_0^{\infty} R_{PQ}(\tau-\Theta) K_P(\Theta) d\Theta + \\ & + \int_0^{\infty} R_{GQ}(\tau-\Theta) K_G(\Theta) d\Theta + \\ & + \int_0^{\infty} R_{fQ}(\tau-\Theta) K_f(\Theta) d\Theta; \\ R_{\varphi E}(\tau) = & \int_0^{\infty} R_{QE}(\tau-\Theta) K_Q(\Theta) d\Theta + \\ & + \int_0^{\infty} R_{PE}(\tau-\Theta) K_P(\Theta) d\Theta + \\ & + \int_0^{\infty} R_{GE}(\tau-\Theta) K_G(\Theta) d\Theta + \\ & + \int_0^{\infty} R_{fE}(\tau-\Theta) K_f(\Theta) d\Theta; \\ R_{\varphi G}(\tau) = & \int_0^{\infty} R_{QG}(\tau-\Theta) K_Q(\Theta) d\Theta + \\ & + \int_0^{\infty} R_{PG}(\tau-\Theta) K_P(\Theta) d\Theta + \\ & + \int_0^{\infty} R_{GG}(\tau-\Theta) K_G(\Theta) d\Theta + \\ & + \int_0^{\infty} R_{fG}(\tau-\Theta) K_f(\Theta) d\Theta, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $R_i(\tau)$ ,  $R_{ij}(\tau)$  — соответственно автокорреляционные и взаимокорреляционные функции ( $i$  и  $j$  принимают соответственно значения  $\varphi$ ,  $Q$ ,  $P$ ,  $G$ ,  $f$  и  $Q$ ,  $E$ ,  $G$ ).

В связи с гипотезой о независимости внутренних шумов от внешних воздействий [4] слагаемые

$$\int_0^{\infty} R_{GQ}(\tau-\Theta) K_G(\Theta) d\Theta, \quad \int_0^{\infty} R_{fQ}(\tau-\Theta) K_f(\Theta) d\Theta, \\ \int_0^{\infty} R_{QE}(\tau-\Theta) K_Q(\Theta) d\Theta;$$



Р и с. 3. Обобщенная структурная схема алгоритма расчета статистических характеристик сигнала  $f(t)$ . (\* — символ операции свертки).

$$\int_0^{\infty} R_{jE}(\tau - \Theta) K_f(\Theta) d\Theta,$$

$$\int_0^{\infty} R_{QG}(\tau - \Theta) K_Q(\Theta) d\Theta,$$

$$\int_0^{\infty} R_{jG}(\tau - \Theta) K_f(\Theta) d\Theta$$

системы уравнений (2) соответственно обращаются в нуль. Слабая корреляция между  $\varphi(t)$  и  $E(t)$  исключает из рассмотрения второе уравнение системы (2). В связи с этим импульсная переходная функция  $K_Q(t)$  была определена осцилляторным методом, поскольку  $Q(t)$  является внешним независимым возмущающим воздействием.

Для решения системы вида (2) относительно  $K(\Theta)$  на основе анализа известных методов [5, 6] в качестве типового алгоритма определения  $K(\Theta)$  была установлена целесообразность применения статистической поисковой процедуры. В данном случае дискретная процедура обработки информации с помощью ЦВМ приводит к образованию эквивалентной (2) системы алгебраических уравнений, решение которой сводится к применению модификации градиентного метода [7].

Рассмотренные выше принципы определения динамических характеристик позволяют построить процедуру выделения сигнала собственных шумов  $f(t)$  и затем найти его статистические характеристики.

Из обобщенной структурной схемы алгоритма (рис. 3) очевиден следующий порядок обработки информации: 1) реализации непрерывных функций  $Q(t)$ ,  $P(t)$ ,  $G(t)$  преобразуются в последовательность дискретных отсчетов; 2) осуществляется дискретный эквивалент операции свертки каждой последовательности с соответствующей весовой функцией; 3) случайные процессы, полученные на выходе цифровых фильтров, суммируются; 4) вычитанием суммы процессов из дискретной выборки процесса  $\varphi(t)$  определяется сигнал  $f(t)$ ; 5) определяется корреляционная функция процесса и его спектральная плотность [8].

**Результаты исследований.** Характеристики выделенного сигнала внутренней помехи анализировались в пространстве теплотехнических параметров относительно границы устойчивой работы испарительного канала. Обработка реализаций паросодержания проводилась в дискретной форме на цифровой вычислительной машине БЭСМ-3М с применением специализированной системы оперативной обработки данных по методике, изложенной в работе [8], с построением корреляционных функций и спектральных плотностей.

Режимы экспериментирования (длина реализации и время сдвига корреляционных функций) выбирались из условия обеспечения числа степеней свободы оценки спектральной плотности порядка 36 [8].

Полученные автокорреляционные функции процессов носят экспоненциально-косинусный характер. Время корреляции  $\tau_k$  для большинства устойчивых процессов находится в пределах 0,25—0,5 сек. Каких-либо закономерностей в изменении  $\tau_k$  в зависимости от положения рабочей точки в пределах области устойчивости не наблюдалось. Нулевое значение корреляционной функции при  $\tau \rightarrow \infty$  подтверждает гипотезу о эргодичности наблюдаемых процессов [9]. Косинусная составляющая корреляционных функций свидетельствует о наличии скрытой периодичности в сигнале шума паросодержания при устойчивой работе испарительного канала\*.

Следует более подробно остановиться на связи параметров скрытой периодичности с поло-

\* Подобные результаты отмечались ранее в работах [10] и [11]. В них подчеркивалось наличие резонансных пиков в спектре флуктуаций паросодержания с частотой соответственно 6 и 7 гц. В работе [12] отмечается, что спектральный состав шума паросодержания в диапазоне частот до 10 гц подчинен закону «белого шума».

жением рабочей точки относительно границы устойчивой работы испарительного канала. Анализ более удобно проводить со спектральными плотностями рассматриваемых процессов. На рис. 4 изображены спектральные плотности флюктуации паросодержания для некоторых устойчивых рабочих режимов. Как видно из этого рисунка, по мере приближения рабочей точки к границе устойчивости резонансный пик спектра соответствующего режима мигрирует в сторону низких частот. При этом отмечается рост избирательности резонанса с некоторым ростом дисперсии процесса. Ограниченное число экспериментов не позволило установить характер изменения резонансной частоты при каких-либо иных траекториях движения рабочей точки к границе устойчивости. При пульсационных режимах (см. точки 3, 7 на рис. 1), когда наблюдалась разверка расходов по трубкам канала, был зарегистрирован спектр шума паросодержания, изображенный на рис. 4 (соответственно кривые 3, 7).

Не исключена возможность, что в работе [12] авторам не удалось зарегистрировать резонансный пик вследствие большого запаса устойчивости рабочего режима (в работе не приводятся значения теплотехнических параметров исследуемого режима). Можно предположить, что резонансный пик был либо слишком размыт, либо находился вне пределов рассматриваемого автором диапазона частот.

Известно, что когда исследуемый объект имеет минимальный запас устойчивости, то его вычисленная частотная характеристика имеет скачки при частотах, близких к значениям полюсов передаточной функции рассматриваемого объекта [13]. Резкие выбросы спектра шума паросодержания в области нулевых частот для пульсационных, т. е. неустойчивых, режимов (см. рис. 4, кривые 3, 7) позволяют предположить о наличии определенной связи между резонансными частотами рассматриваемых спектров и положением корней характеристического уравнения передаточных функций данного испарительного канала на плоскости комплексного переменного. Иначе говоря, наблюдаемые закономерности позволяют высказать предположение, что значения резонансной частоты и амплитуды рассматриваемого спектра однозначно определяют запас устойчивости параллельно работающих трубок технологического канала.

Приведенные результаты позволяют полагать, что спектр шума паросодержания параллельно работающих каналов несет в себе достаточную информацию для определения собствен-

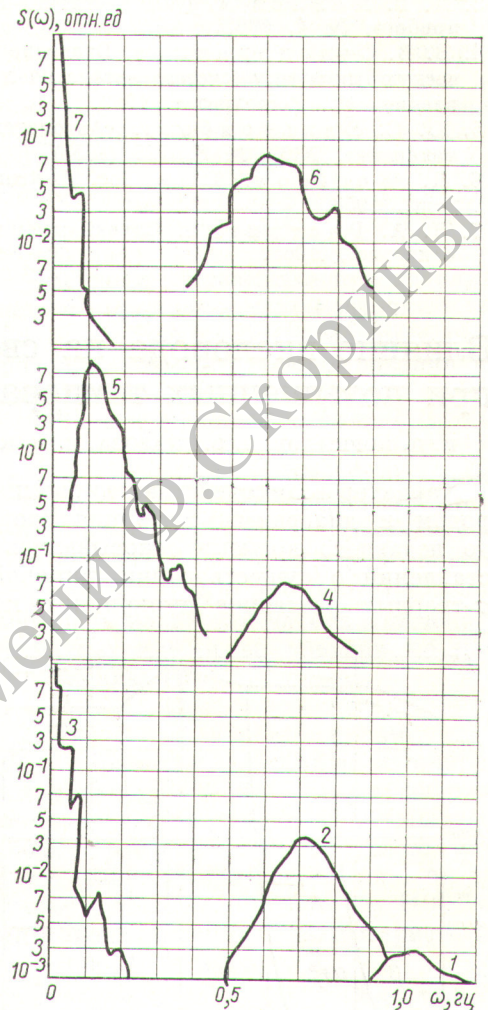


Рис. 4. Спектральные плотности флюктуаций паросодержания для различных режимов работы испарительного канала. Обозначения кривых соответствуют рабочим точкам, изображенным на рис. 1.

ного запаса устойчивости и в принципе может служить как индикатор для распознавания гидродинамических аномалий в сложной системе параллельно работающих каналов.

Поступила в Редакцию 16/II 1968 г.  
В окончательной редакции 7/VI 1968 г.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. А. Н. Григорьянц и др. Доклад № 358, представленный СССР на Третью международную конференцию по мирному использованию атомной энергии (Женева, 1964).
2. В. Н. Смолин и др. «Атомная энергия», 19, 261 (1965).

3. М. Г. Козлов «Труды института НИИТеплоприбор», № 4, 1962.
4. В. В. Солодовников. Введение в статистическую динамику систем автоматического управления. М., Гостехиздат, 1952.
5. Ю. С. Вальденберг. «Автоматика и телемеханика», XIX, № 8, 725 (1958).
6. R. Woodrow. Trans. Soc. Instrum. Techn., Sept., 1958.
7. Л. А. Растрингн. Случайный поиск. Рига, «Зинатне», 1965.
8. Б. Н. Селиверстов и др. «Атомная энергия», 25, вып. 4, 287 (1968).
9. Е. С. Венцель. Теория вероятности. М., Физматгиз, 1962.
10. И. Я. Емельянов, П. А. Гаврилов, Б. Н. Селиверстов. «Инж.-физ. ж.», VIII, № 6, 768 (1965).
11. T. Terano et al. Annual Meeting of Atomic Energy. Society of Japan. С. 54, 1963.
12. A. Eugola. ANL-6369, 1961.
13. Основы автоматического регулирования. Под ред. В. В. Солодовникова. М., Машгиз, 1954.

## Влияние кислорода на свойства циркония при повышенных температурах

И. И. Корнилов, В. В. Глазова, Е. М. Кенина

УДК 669.296:539.4

Характер взаимодействия циркония с кислородом и диаграмма состояния этой системы до недавнего времени основывались на представлении о существовании широкой области  $\alpha$ -твердых растворов циркония с кислородом

[1, 2]. Однако исследования методами физико-химического анализа в области концентраций 1—28 ат. % кислорода показали [3], что помимо ранее известного соединения  $ZrO_2$  в системе существуют два новых соединения типа субоксидов  $Zr_6O$  и  $Zr_3O$ , в которых содержится 14,3 и 25 ат. % кислорода соответственно. При этом область твердых растворов кислорода в  $\alpha$ -цирконии ограничивается 7—8 ат. %. На рис. 1 приведена новая диаграмма состояния системы  $Zr - O$  [3]. Методом рентгеноструктурного анализа доказана упорядоченная структура соединения  $Zr_3O$  [4, 5].

В связи с установлением в системе цирконий — кислород нового характера фазового равновесия представляло интерес исследовать влияние кислорода на свойства циркония при повышенных температурах.

Известно, что кислород теряет упрочняющую эффективность при повышенных температурах. Так, например, у полученного дуговой плавкой иодидного циркония, содержащего 0,2 вес. % (1 ат. %) кислорода, напряжение, необходимое для достижения скорости ползучести порядка  $10^{-4}$  в 1 ч при  $260^\circ C$ , составляет приблизительно  $10,5 \text{ кг/мм}^2$  [6, 7]. В случае нелегированного иодидного листового циркония для достижения такой же скорости ползучести при этой же температуре необходимо напряжение, равное  $9,84 \text{ кг/мм}^2$  [8]. На основании проведенных исследований можно сделать вывод о незначительном влиянии кислорода на повышение сопротивления ползучести при температуре  $260^\circ C$ . В работе [9] отмечается, что воздействие кислорода при более высоких температурах становится ничтожным.

Ниже приводятся результаты исследований влияния кислорода на свойства циркония мето-

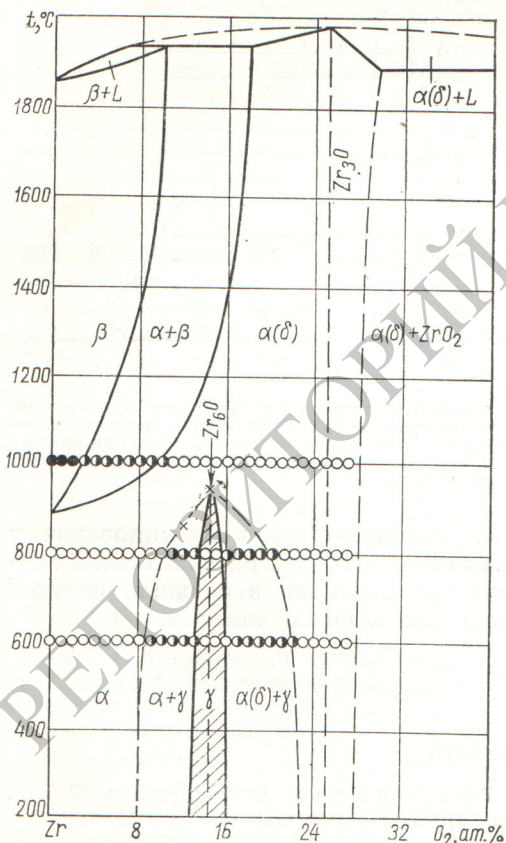


Рис. 1. Диаграмма состояния системы цирконий — кислород [3].