

УДК 678-419:621.78

## АЛГОРИТМИЗАЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ РЕЖИМАМИ ПРОЦЕССА АВТОКЛАВНОГО ФОРМОВАНИЯ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

А. Г. Лютов<sup>1</sup>, Е. А. Закурдаева<sup>2</sup>

<sup>1</sup>lutov1@mail.ru, <sup>2</sup>zak.ea@mail.ru

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (УГАТУ)

Поступила в редакцию 11.05.2015

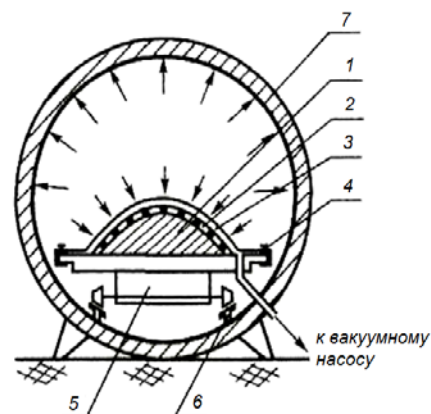
**Аннотация.** Рассмотрены вопросы алгоритмизации управления режимами процесса автоклавного формования деталей из полимерных композиционных материалов в контурах температуры и давления с учетом их взаимосвязи и динамики в условиях действия внутренних и внешних возмущений процесса. Процедура алгоритмизации обусловлена необходимостью последующего составления базы правил для реализации нечеткого управления процессом, обеспечивающего требуемые показатели в условиях неопределенности параметров, влияющих на качество формируемых деталей.

**Ключевые слова:** полимерные композиционные материалы; процесс автоклавного формования; регулирование температуры и давления; динамика процесса; алгоритмизация управления.

### ВВОДНЫЕ ЗАМЕЧАНИЯ

Технология изготовления деталей из полимерных композиционных материалов (ПКМ), широко используемых в авиационном производстве, в частности при изготовлении деталей корпусов вертолетов, состоит в следующем. Из пропитанных специальными связующими материалами стекло- и углетканей вырезают контур будущей детали. Многослойную конструкцию укладывают на оснастку для придания требуемой формы, сверху накрывают герметичной пленкой и подключают к вакуумной линии. Конструкцию помещают на тележку и загружают в автоклав, в котором она подвергается многоступенчатой температурной обработке с приложением давления [1] (рис. 1). В результате процесса автоклавного формования (ПАФ) получается конструкция с высокими прочностными свойствами.

В настоящее время управление ПАФ осуществляют с использованием классических систем автоматического регулирования (САР) на основе типовых ПИ- и ПИД-регуляторов (для контуров регулирования давления и температуры соответственно). Однако их применение не дает удовлетворительных результатов вследствие специфики управляемого объекта: нелинейности его внутренних связей, нестационарности и неопределенности параметров, наличия неконтролируемых возмущений.



**Рис. 1.** Автоклавное формование:  
1 – оснастка; 2 – деталь (многослойная конструкция из ПКМ); 3 – герметичная пленка; 4 – уплотнители; 5 – тележка; 6 – рельсы; 7 – автоклав

В существующей практике качество процессов управления ПАФ зависит от выбора настроек параметров типовых регуляторов, значения которых определяют операторы, основываясь на своих знаниях и опыте. Однако для процессов управления ПАФ, протекающих в условиях неопределенности, зачастую требуются квалифицированные оперативные мероприятия по поднастройке и перенастройке параметров типовых регуляторов. При этом основным требованием, предъявляемым к таким системам управления,

является минимизация отклонений технологических параметров от эталонных, в том числе и в динамических режимах.

На производстве ПАФ ведется без использования эталонных моделей, отражающих заданные траектории управления режимами, т. е. поддержание температуры и давления в заданных пределах, а также темпы нарастания и сброса режимных параметров в автоклаве задает оператор в соответствии с технологическим регламентом. Наличие данного субъективного фактора, зависящего от квалификации и опыта оператора, приводит на практике к отклонению от эталонной траектории управления режимами ПАФ и, как следствие, снижению качества и дорогостоящему браку формуемых деталей, а также к существенным энергетическим потерям и временным издержкам из-за неэффективного использования автоклавного оборудования.

Дефекты, возникающие в формуемых деталях при несоблюдении технологических режимов температуры и давления, подробно рассмотрены в работе [2].

Таким образом, задача повышения качества управления ПАФ является актуальной и требует применения новых подходов к управлению данным объектом в условиях неопределенности, в частности, на основе интеллектуальных технологий. Здесь наиболее целесообразным является применение нечеткой логики [3], основанной на механизмах принятия решений с использованием базы знаний, одной из составляющих которой является база правил, формируемая на основе знаний и опыта экспертов-специалистов и высококвалифицированного персонала в области управления ПАФ. Для составления базы правил первоочередной задачей является алгоритмизация процессов управления ПАФ.

#### АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА УПРАВЛЕНИЯ ПАФ

Система управления ПАФ состоит из трех взаимосвязанных контуров – по температуре, давлению и разрежению при формовании (рис. 2).

Задающие воздействия на контуры управления исходят от оператора, ответственного за ПАФ. Ввиду того, что контур разрежения не требует изменения управляющих воздействий в процессе формования деталей, алгоритмизация ПАФ необходима лишь для контуров управления по температуре и давлению.

Функционально САР температуры формования детали состоит из симисторного регулятора мощности (СРМ), трубчатых электронагревателей (ТЭН), датчиков температуры. Мощ-

ность, подаваемая на ТЭНы, регулируется СРМ, который управляется сигналом ошибки. Температуру воздуха по всему объему автоклава можно считать постоянной благодаря равномерному распределению вентилятором тепловых потоков воздушных масс. В результате осуществляется конвективный нагрев поверхностных слоев формуемых деталей. Вглубь детали тепловая энергия передается за счет теплопроводности слоев формуемого ПКМ.

Нежелательное расхождение реального значения температуры детали с эталонным является следствием одного или нескольких возмущающих воздействий:

- низкая теплопроводность ПКМ;
- чрезмерное увеличение или падение температуры в результате влияния изохорного процесса;
- влияние температуры воздуха, поступающего по трубопроводу из ресивера, на температуру воздуха в автоклаве.

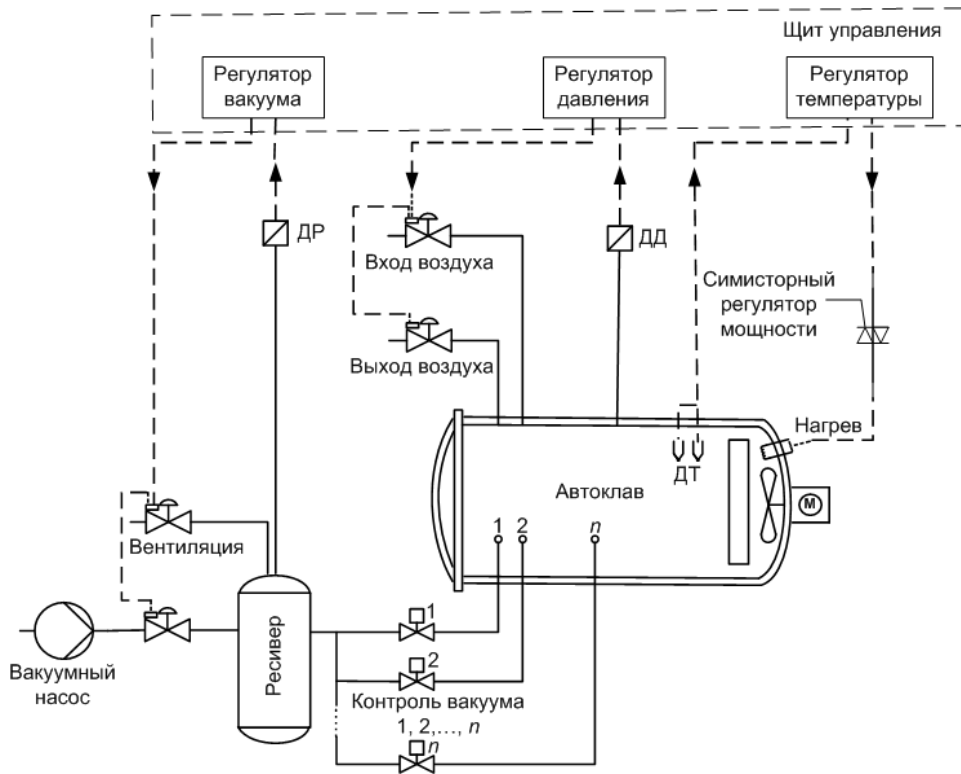
В свою очередь, САР давления в автоклаве функционально состоит из компрессора, ресивера, трубопровода и задвижки, подающей воздух в автоклав, автоклава, трубопровода и задвижки, сбрасывающей излишнее давление воздуха из автоклава, датчика давления, подающего сигнал на регулятор давления. Давление в ресивер нагнетается с помощью компрессора, при этом давление на любой части поверхности детали одинаково. Необходимые темпы нарастания, стабилизации и сброса давления в автоклаве существенно влияют на кинетику процесса формования крупногабаритных конструкций из ПКМ в автоклаве.

Аналогично предыдущей САР, нежелательное расхождение реального значения давления с эталонным является следствием одного или нескольких возмущающих воздействий на систему прессования:

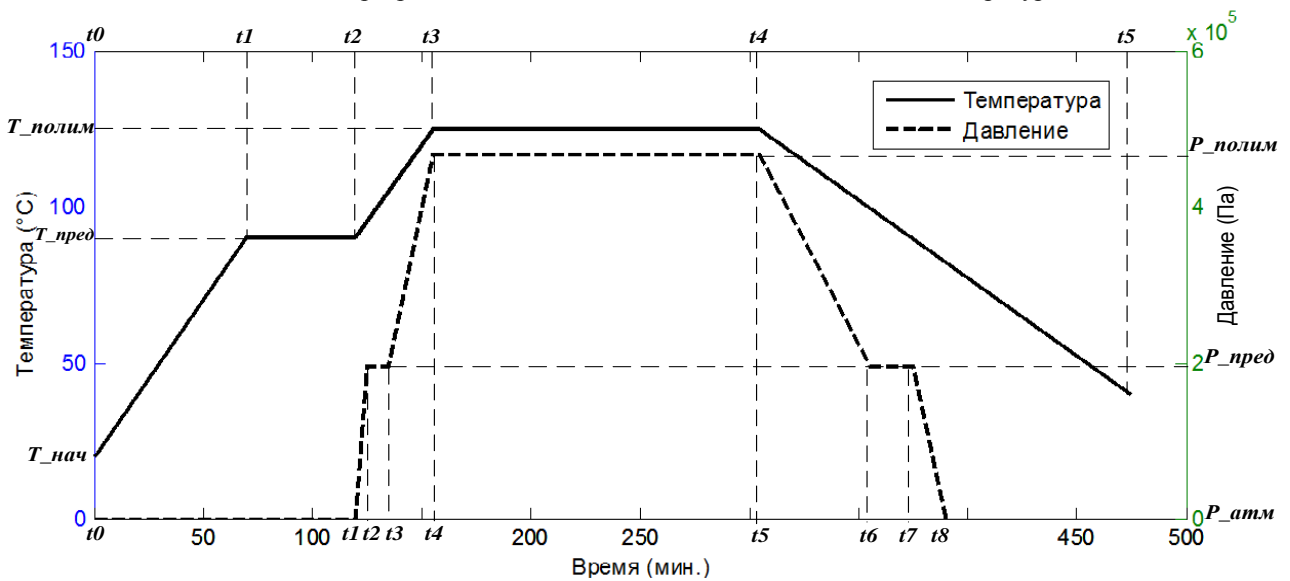
- падение напора (потеря давления) в трубопроводных магистралях между ресивером и автоклавом;
- чрезмерное увеличение или падение давления в результате влияния изохорного процесса.

Основным требованием, предъявляемым к таким САР ПАФ, является минимизация отклонений технологических параметров от эталонных, в том числе и в динамических режимах, которые должны быть согласованы во времени.

В качестве примера на рис. 3 изображены совмещенные эталонные диаграммы ( $T$ - $P$ -траектории) температуры и давления формования обшивки каркаса двери кабины вертолета Ка-226 на эпоксидном связующем ЭДТ-69Н.



**Рис. 2.** Принципиальная схема автоклавного комплекса:  
 ДР – датчик разрежения; ДД – датчик давления; ДТ – датчик температуры

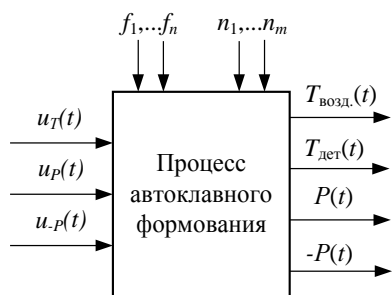


**Рис. 3.** Программно заданные  $T$ - $P$ -траектории формирования обшивки

Анализ ПАФ позволил выявить факторы, влияющие на качество деталей из полимерных композиционных материалов. Входные и выходные переменные объекта управления представлены на рис. 4 в виде модели типа «черный ящик».

Внутренние и внешние возмущающие воздействия влияют на качество ПАФ деталей из ПКМ, но часть этих возмущений либо не поддается наблюдению и управлению, либо эти возможности существенно ограничены.

Кроме этого, в существующих САР ПАФ не автоматизирована процедура формирования задающих воздействий с учетом требований по динамике изменения факторов, влияющих на теплофизические свойства формируемой детали, а именно требуемых скорости изменения температуры  $dT/dt$  и скорости изменения давления  $dP/dt$ . За контроль и регулирование этих переменных ответственность несет оператор.



**Рис. 4.** Концептуальная модель ПАФ типа «черный ящик»:  $u_T, u_P, u_{-P}$  – управляющие сигналы, вырабатываемые САУ, по температуре, давлению и вакууму соответственно;  $T_{\text{возд.}}(t), T_{\text{дет.}}(t), P(t), -P(t)$  – сигналы, снимаемые датчиками с выхода объекта по температуре воздуха, температуре детали, давлению и вакууму соответственно;  $f_1, \dots, f_n$  – внутренние возмущения (явление саморазогрева, давление летучих паров связующего при его разогреве, выделение из формируемого ПКМ излишков связующего и т. д.);  $n_1, \dots, n_m$  – внешние возмущения (скорость вращения вентилятора и, как следствие, движение потоков воздуха в автоклаве, скорость реакции оператора по отслеживанию и регулированию параметров ПАФ и т. д.)

Учет указанных переменных при автоматическом управлении ПАФ совершенно необходим для обеспечения требуемого качества изго-

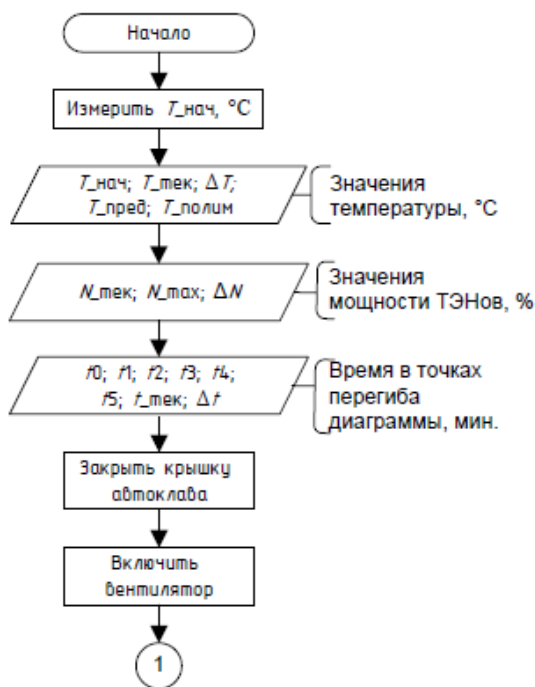
тавливаемых деталей из полимерных композиционных материалов.

#### АЛГОРИТМИЗАЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ РЕЖИМАМИ ПАФ

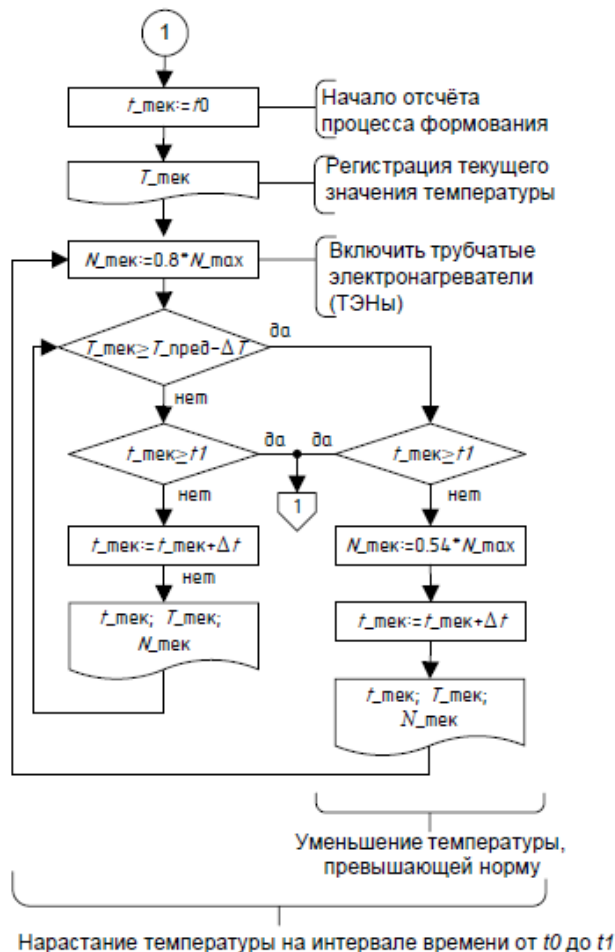
Причина неудовлетворительной работы существующих систем управления ПАФ связана, в основном, с отсутствием их всесторонней алгоритмической проработки. Алгоритмизация является необходимым этапом перехода от ручного управления на основе технологического регламента к формированию алгоритмов автоматического управления ПАФ. В то же время алгоритмизация является основой для последующего построения нечеткого управления ПАФ, в частности для составления нечетких правил.

В соответствии с рис. 3 алгоритм управления температурой в автоклаве разбит на 5 участков:

- 1) задание начальных параметров температурного режима; линейное нарастание температуры на интервале  $[t_0; t_1]$  (рис. 5);
- 2) стабилизация температуры на участке предварительного отверждения на интервале  $[t_1; t_2]$  (рис. 6);



**Рис. 5.** Задание начальных параметров температурного режима; линейное нарастание температуры на интервале  $[t_0; t_1]$



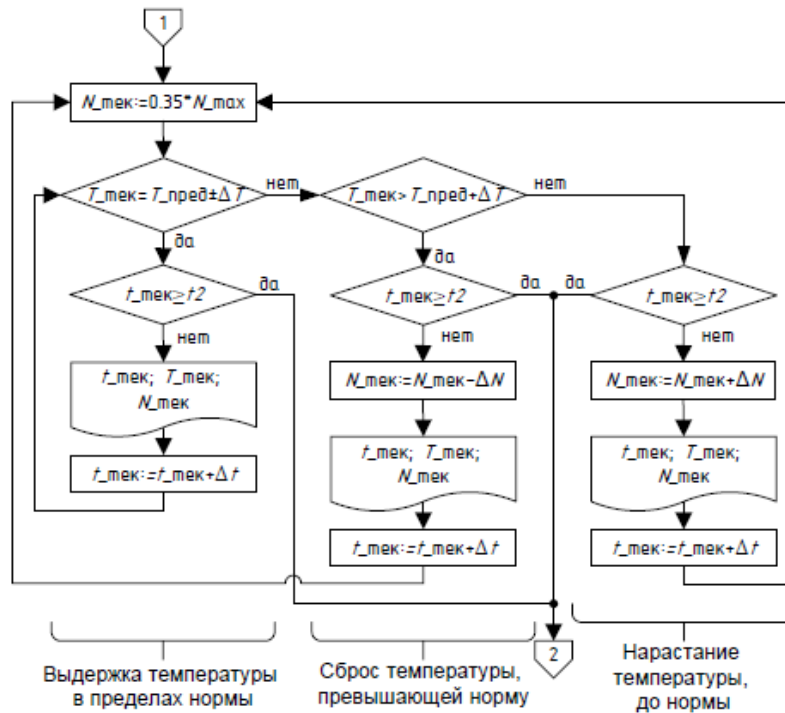


Рис. 6. Стабилизация температуры участка предварительного отверждения на интервале  $[t_1; t_2]$

3) линейное нарастание температуры на интервале  $(t_2; t_3)$  (аналогично рис. 5);

4) стабилизация температуры на участке полимеризации на интервале  $[t_3; t_4]$  (аналогично рис. 6);

5) линейный сброс температуры на интервале  $[t_4; t_5]$  (рис. 7).

Описание переменных, используемых в алгоритме регулирования температуры, представлено в табл. 1.

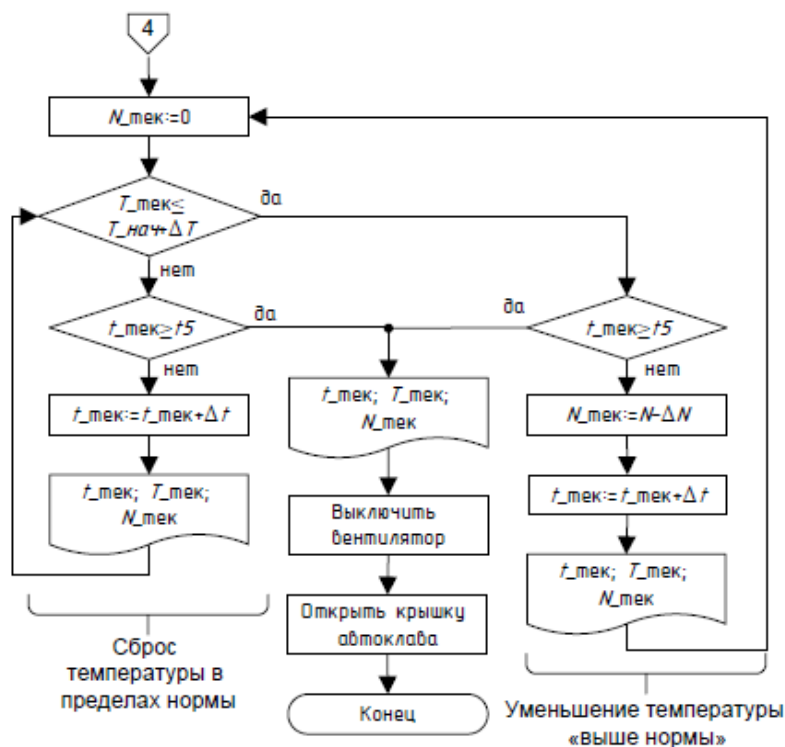


Рис. 7. Линейный сброс температуры на интервале  $(t_4; t_5]$

Таблица 1

## Описание переменных, используемых в алгоритме регулирования температуры

Переменная	Назначение	Единица измерения
$T_{\text{нач}}$	начальная температура, температура окружающей среды	°С
$T_{\text{тек}}$	текущее значение температуры	°С
$T_{\text{пред}}$	температура предварительного отверждения в автоклаве на первой ступени нагрева	°С
$\Delta T$	допустимый диапазон изменения температуры детали в автоклаве	°С
$T_{\text{полим}}$	температура полимеризации в автоклаве на второй ступени нагрева	°С
$t_0$	время начала процесса формования, с	с.
$t_1; t_2; t_3; t_4; t_5; t_6$	значения времени в точках перегиба диаграммы температуры	с.
$t_{\text{тек}}$	текущее значение времени	с.
$\Delta t$	приращение времени	с.
$N_{\text{max}}$	максимальное значение мощности ТЭНов, 594	кВт
$N_{\text{тек}}$	текущее значение мощности ТЭНов	кВт
$\Delta N$	приращение мощности ТЭНов, 9,26	кВт

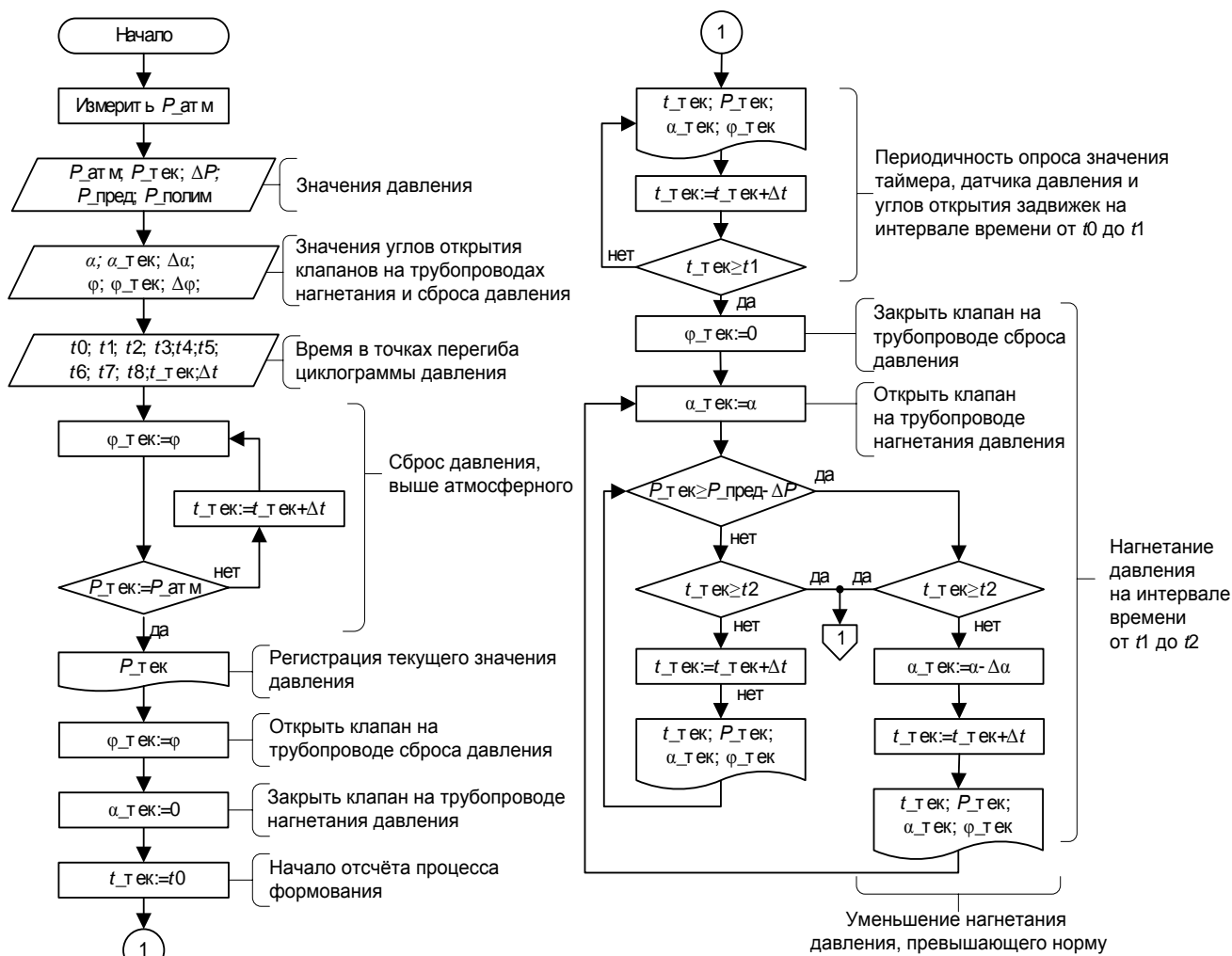


Рис. 8. Задание начальных параметров процесса; выдержка давления на интервале  $[t_0; t_1]$ ; линейное нарастание давления на интервале от  $(t_1; t_2)$

В соответствии с рис. 3 алгоритм управления давлением в автоклаве разбит на 7 участков:

1) задание начальных параметров процесса; выдержка давления на интервале  $[t_0; t_1]$ ; линей-

ное нарастание давления на интервале  $(t_1; t_2)$  (рис. 8);

2) стабилизация предварительного давления на интервале  $[t_2; t_3]$  (рис. 9);

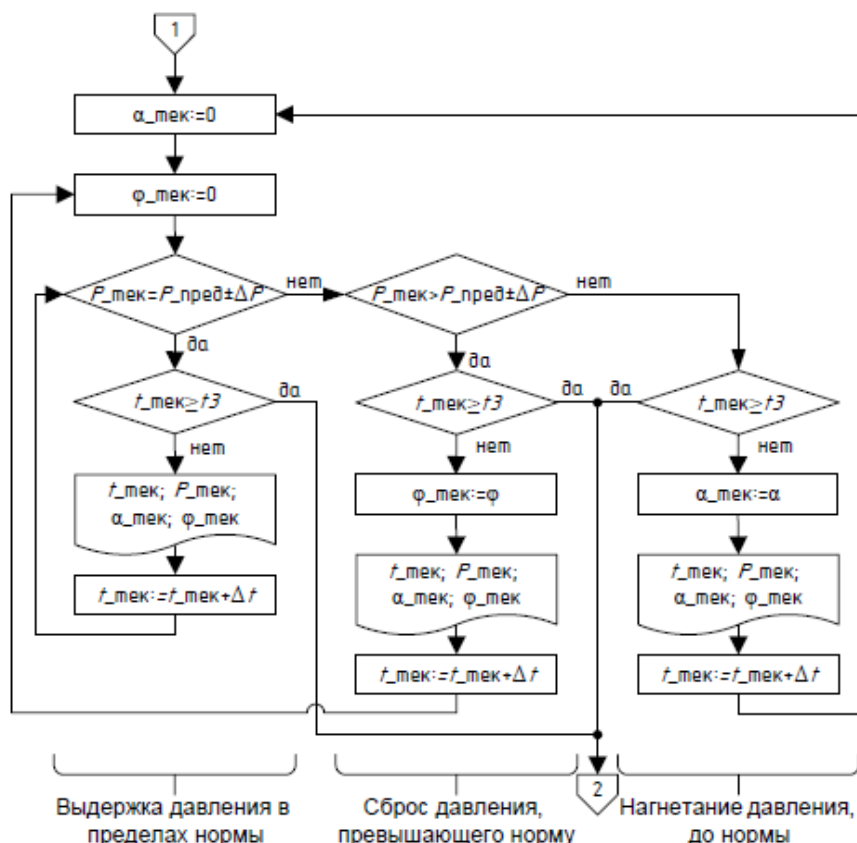


Рис. 9. Стабилизация предварительного давления на интервале  $[t_2; t_3]$

3) линейное нарастание давления на интервале  $(t_3; t_4)$  (аналогично рис. 8);

4) стабилизация давления полимеризации на интервале  $[t_4; t_5]$  (аналогично рис. 9);

5) линейный сброс давления из автоклава на интервале  $(t_5; t_6)$  (рис. 10);

6) стабилизация предварительного давления на интервале  $[t_6; t_7]$  (аналогично рис. 9);

7) линейный сброс давления на интервале  $(t_7; t_8)$  (аналогично рис. 10).

Описание переменных, используемых в алгоритме регулирования давления, представлено в табл. 2.

Разработанные алгоритмы направлены на совершенствование и модернизацию СУ ТП автоклавного комплекса при производстве деталей из ПКМ.

Для реализации нечеткого управления на основе разработанных выше алгоритмов необходима организация периодического измерения температуры и давления формуемой детали внутри автоклава в определенные дискретные моменты времени. При этом частота дискретизации измерений должна быть согласована с динамикой и необходимой точностью регулирования температуры и давления ПАФ.

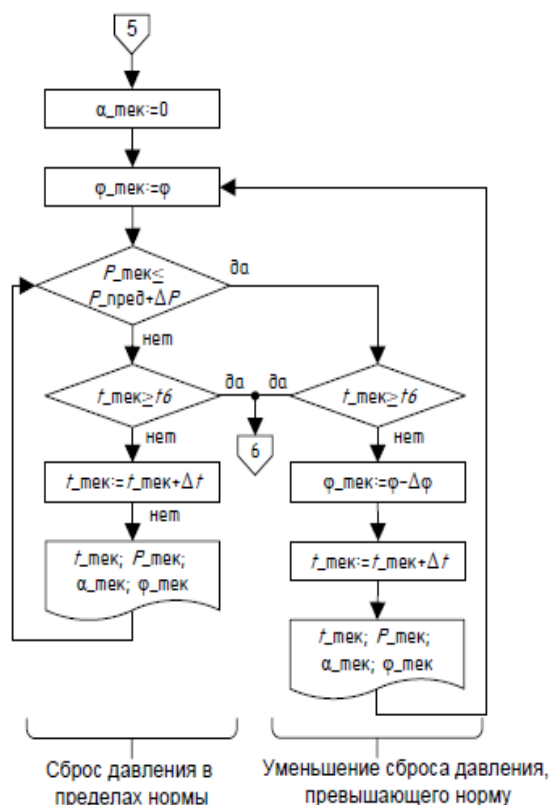


Рис. 10. Линейный сброс давления из автоклава на интервале  $(t_5; t_6)$

Таблица 2

## Описание переменных, используемых в алгоритме регулирования давления

Переменная	Назначение	Единица измерения
$P_{\text{атм}}$	атмосферное давление	Па
$P_{\text{тек}}$	текущее значение давления	Па
$P_{\text{пред}}$	предварительное давление в автоклаве на первой ступени нагнетания и третьей ступени сброса	Па
$\Delta P$	допустимый диапазон изменения давление в автоклаве	Па
$P_{\text{полим}}$	давление полимеризации в автоклаве на второй ступени нагнетания	Па
$t_0$	время начала процесса регулирования давления	с.
$t_1; t_2; t_3; t_4;$ $t_5; t_6; t_7; t_8$	значения времени в точках перегиба циклограммы давления	с.
$t_{\text{тек}}$	текущее значение времени	с.
$\Delta t$	приращение времени	с.
$\alpha$	угол открытия клапана на трубопроводе нагнетания давления в автоклав	%
$\alpha_{\text{тек}}$	текущее значение угла открытия клапана на трубопроводе нагнетания давления в автоклав	%
$\Delta\alpha$	приращение угла открытия клапана на трубопроводе нагнетания давления в автоклав, 1,56	%
$\varphi$	угол открытия клапана на трубопроводе сброса давления из автоклава	%
$\varphi$	текущее значение угла открытия клапана на трубопроводе сброса давления из автоклава	%
$\Delta\varphi$	приращение угла открытия клапана на трубопроводе сброса давления из автоклава, 1,56	%

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Достоверность разработанных алгоритмов основывается на результатах, полученных в [4].

Решены задачи алгоритмизации управления режимами ПАФ деталей из ПКМ в контурах температуры и давления с учетом их взаимосвязи и динамики в условиях действия внутренних и внешних возмущений процесса. Алгоритмизация является основой для перехода от ручного управления на основе технологического регламента к формированию алгоритмов автоматического управления ПАФ и составления нечетких правил для последующей реализации нечеткого управления процессом, обеспечивающего требуемые показатели в условиях неопределенности параметров, влияющих на качество формуемых деталей.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Полимерные** композиционные материалы: структура, свойства, технология / под ред. А. А. Берлина. СПб.: Профессия, 2009. 560 с. [*Polymeric composites: structure, properties, technology: studies*. A. A. Berlin (Ed.). St. Petersburg: Professiya, 2009. ]

2. **Люттов А. Г., Закурдаева Е. А.** Анализ влияния автоклавных режимов формования многослойных конструкций на физико-механические свойства деталей // Автоматизация и управление технологическими и производственными процессами: мат. Всерос. науч.-практ. конф. Уфа: УГАТУ,

2013. С. 254–258. [ A. G. Lutov, E. A. Zakurdaeva, "Analysis of the impact of modes of autoclave molding of multilayer structures on the physical and mechanical properties of the parts," in *Automation and management of technological and production processes: Materials of All-Russian scientific-practical conference*, pp. 254-258, Ufa: USATU, 2013. ]

3. **Васильев В. И., Ильясов Б. Г.** Интеллектуальные системы управления. Теория и практика: учебное пособие. М.: Радиотехника, 2009. 392 с. [ V. I. Vasiliev, B. G. Ilyasov, *Intelligent Control Systems. Theory and practice: a tutorial*. Moscow: Radiotekhnika, 2009. ]

4. **А. Г. Люттов, Е. А. Закурдаева** Интеллектуальная система управления температурой автоклавного формования многослойных крупногабаритных конструкций / Автоматизация и управление технологическими и производственными процессами: материалы Всерос. науч.-практ. конф. Уфа: УГАТУ, 2013. С. 121 – 125. [ A. G. Lutov, E. A. Zakurdaeva, "Intelligent control system temperature autoclave molding multilayer large structures" in *Automation and management of technological and production processes: Materials of All-Russian scientific-practical conference*, pp. 121 - 125, Ufa: USATU, 2013. ]

## ОБ АВТОРАХ

**ЛЮТОВ Алексей Германович**, проф., зав. каф. автоматиз. технологич. процессов. Дипл. инж.-электроник (УАИ, 1985). Д-р техн. наук по сист. анализу, упр. и обработке инф. (УГАТУ, 2005). Иссл. в обл. автоматизации и управления сложн. технол. и произв. процессами.

**ЗАКУРДАЕВА Елена Анатольевна**, ст. преп. каф. пром. автоматизации филиала в Кумертау. Дипл. инж. (УГАТУ, 2002). Иссл. в обл. автоматиз. и упр. сложн. технол. и произв. процессами.



**METADATA**

**Title:** Algorithmization control process mode autoclave molding parts from polymeric composite materials.

**Authors:** A. G. Lutov<sup>1</sup>, E. A. Zakurdaeva<sup>2</sup>.

**Affiliation:**

Ufa State Aviation Technical University (USATU), Russia.

**Email:** <sup>1</sup>lutov1@mail.ru, <sup>2</sup>zak.ea@mail.ru

**Language:** Russian.

**Source:** Vestnik USATU, vol. 20, no. 1 (71), pp. 11–19, 2016. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).

**Abstract:** The questions algorithmization mode control process, autoclave molding parts from polymeric composite materials in the contours of temperature and pressure and taking into account the dynamics of the relationship and in terms of internal and external disturbances of the process. Procedure algorithmization subsequent formation due to the need for the implementation of the rule base of fuzzy control process provides the required performance in the face of uncertainty parameters affecting the quality of the molded parts.

**Key words:** polymeric composites; autoclave molding process; regulation of temperature and pressure; dynamics of the process; algorithmization.

**About authors:**

**LYUTOV, Alexey Germanovich**, Prof., Head of the Automation of Technological Processes Department., Dipl. Electronics Engineer (UAI, 1985). Dr. of Technical Sciences (USATU, 2005).

**ZAKURDAEVA, Elena Anatolevna**, senior lecturer in industrial automation Dipl. Automation Engineer (USATU, 2002).