

XIX ЕВРОПЕЙСКИЙ КОНГРЕСС РАБОТНИКОВ НИИ МЯСНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

ВСЕСОЮЗНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
МЯСНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ СССР

ДЕФОРМАЦИОННО-РЕЛАКСАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГОВЯЖЬЕГО МЯСА ПРИ
ОСЕВОМ СЖАТИИ

А.В.ГОРБАТОВ, А.Н.ПОЗНЫШЕВ, Е.К.НАИМИ

THE XIXth EUROPEAN MEETING OF MEAT RESEARCH INSTITUTES

THE ALL-UNION RESEARCH INSTITUTE OF MEAT INDUSTRY USSR

DEFORMATION-RELAXATION CHARACTERISTICS OF BEEF MEAT UNDER AXIAL
COMPRESSION

A. V. GORBATOV, A. N. POZNYSCHEV, E. K. NAIMI

DER XIX. EUROPÄISCHE KONGRESS DER FLEISCHFORSCHUNGSGESELLSCHAFT

ALLUNIONS-FORSCHUNGSGESELLSCHAFT DER FLEISCHWIRTSCHAFT UDSSR

DEFORMIERUNGS-RELAXATIONS-CHARAKTERISTIKA DES RINDFLEISCHES BEI
DER AXIALEN KOMPRESSION

A. W. GORBATOW, A. N. POSNJISCHEW, E. K. NAIMI

А Н Н О Т А Ц И Я

Приведены результаты исследований и аналитический метод определения деформационно-релаксационных характеристик говяжьего мяса при осевом сжатии.

Полученные объективные данные могут быть использованы не только для технологических целей, но и как один из методов контроля при оценке качества продукта.

Испытания проводили на специально разработанном приборе, типа пластометра, позволяющем регистрировать деформацию и нагрузки во времени, при этом осевое сжатие осуществляли в двух режимах - статическом и циклическом в интервале нагрузок от 0 до $1,2 \cdot 10^5$ Па.

Авторами выявлена определенная функциональная зависимость эффективных модулей упругости и мгновенной plasticности от напряжения в Па.

$$E_I (\sigma) = 2,5 \cdot 10^5 + 156; \quad E_{II} (\sigma) = 1,25 \cdot 10^5 + 156$$

Кроме того, получены следующие феноменологические постоянные, характеризующие структуру неразрушенного говяжьего мяса:

- коэффициенты вязкости $\eta_1 = 1,7 \cdot 10^7$ Па·сек.;

$$\eta_2 = 5,2 \cdot 10^8$$
 Па·сек;

- модуль мгновенной упругости $E_I \approx 3,8 \cdot 10^5$ Па;

- время релаксации деформаций $\tau \approx 45$ сек.

S U M M A R Y

The results of studies and an analytical method for determining deformation-relaxation characteristics of beef meat under axial compression are reported.

The objective data obtained can be used both for technological purposes and as a control method for product quality evaluation.

Tests were made on a specially designed, plastometer-type device which allows to register deformation and loads in relation to time, axial compression being effected under two regimes, viz. static and cyclic, with loads ranging within $0-1.2 \cdot 10^5$ Pa.

The authors found a functional relation of effective moduli of elasticity and instantaneous plasticity to stress in Pa:

$$E_I (\sigma) = 2.5 \cdot 10^5 + 15\sigma; \quad E_{II} (\sigma) = 1.25 \cdot 10^5 + 5\sigma.$$

Besides, the following phenomenological constants are determined which characterize the structure of intact beef meat:

- coefficients of viscosity $\eta_1 = 1.7 \cdot 10^7$ Pa·sec;

$\eta_2 = 5.2 \cdot 10^8$ Pa·sec;

- modulus of instantaneous elasticity $E_I \approx 3.8 \cdot 10^5$ Pa;

- relaxation time of deformation $\tau \approx 45$ sec.

Z U S A M M E N F A S S U N G

Es wurden die Versuchsergebnisse und eine analytische Methode zur Bestimmung von Deformierungs-Relaxations-Charakteristika des Rindfleisches bei der axialen Kompression beschrieben.

Die erhaltenen objektiven Angaben können nicht nur für technologische Zwecke, sondern auch als eine der Kontrollmethoden bei der Einschätzung der Qualität des Produktes ausgenutzt werden.

Die Untersuchungen wurden mit einem speziell entwickelten Gerät Typs eines Plastometers durchgeführt. Das Gerät ermöglichte es, die Deformation und die Belastungen im untersuchten Zeitabschnitt zu registrieren. Die axiale Kompression wurde bei zwei Regimes – dem statischen und dem zyklischen – unter Belastungen von 0 bis $1,2 \cdot 10^5$ Pa ausgeführt.

Es wurde eine bestimmte funktionelle Abhängigkeit des effektiven Elastizitätsmoduls und der augenblicklichen Plastizität von der Spannung in Pa festgestellt.

$$E_I(\epsilon) = 2,5 \cdot 10^5 + 15\epsilon; \quad E_{II}(\epsilon) = 1,25 \cdot 10^5 + 5\epsilon$$

Außerdem wurden auch folgende phenomenologische Konstanten erhalten, die die Struktur des unzerstörten Rindfleisches charakterisieren:

- Viskositätskoeffiziente $\eta_1 = 1,7 \cdot 10^7$ Pa·sek.;
 $\eta_2 = 5,2 \cdot 10^8$ Pa·sek.;
- der augenblickliche Elastizitätsmodul $E_I \approx 3,8 \cdot 10^5$ Pa;
- die Zeit der Relaxation nach Deformationen $\tilde{\tau} \approx 45$ sek.

ДЕФОРМАЦИОННО-РЕЛАКСАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГОВЯЖЬЕГО МЯСА ПРИ ОСЕВОМ СЖАТИИ

Структуру мышечной ткани говяжьего мяса, сложную по своему строению, можно представить в виде мышечных волокон, связанных пространственной соединительнотканой пленкой. Все промежутки структуры заполнены тканевой жидкостью - слабо и сильно связанной влагой. По характеру и прочности связи между частицами мышечную ткань можно отнести, частично, к конденсационно-криSTALLИЗационным системам /1/. Подобные структуры, обладающие рядом свойств твердых тел, имеют некоторые специфические особенности - эластичность, пластичность и др. Эти свойства необходимо учитывать для выбора наиболее целесообразных способов и режимов технологической обработки.

Наряду с многочисленными исследованиями структурно-механических (реологических) свойств измельченного мяса /2, 3/, свойства неразрушенной мышечной ткани изучены недостаточно полно. Рядом авторов /4-8/ исследована деформация мышечной ткани при осевом сжатии в зависимости от величины приложенной нагрузки и различных режимов нагружения. Кроме того, измеряли временные эффекты, характеризуемые эластичностью и релаксацией, в динамическом режиме /9, 10/. Отмечая нелинейный характер деформационного поведения мяса, авторы /7-II/ предлагают эмпирические формулы зависимости относительной деформации образца от величины нагрузки. Однако следует подчеркнуть условный характер предлагаемых зависимостей, так как степень сжатия, при заданной нагрузке, зависит от момента наблюдения, режима нагружения, формы и размеров образца, вида мяса, его структуры, анизотропии и т.д. Фактор времени при этом играет решающую роль, ввиду содержания в структуре тканевой жидкости с определенной вязкостью.

В данной работе изучали характер деформационного поведения неразрушенной мышечной ткани говядины при осевом сжатии поперек волокон. Были исследованы охлажденные образцы четырехглавого мускула говядины, взятые на 2 сут. после убоя животного. Образцы имели квадратное сечение, площадь 30x30 мм и высоту от 10 до 20 мм.

Испытания проводили на специально разработанном во МТИММПе приборе типа пластометра, позволяющем регистрировать одновременно деформации и нагрузки во времени. Принципиальная схема прибора показана на рис. I. Сжатие образца осуществляли между двумя полированными пластинами за счет перемещения верхней пластины толкателем, установленным в направляющих. Нижняя пластина неподвижно закреплена на основании. Прибор приводили в действие электродвигателем постоянного тока. Крутящий момент передавался через редуктор на шкив и далее, при помощи гибкого тросика и рычажной системы с противовесом — на толкатель. Циклические нагрузки на образец создавали путем замены шкива эксцентриком. Перемещение толкателя вниз было ограничено концевым выключателем. Усилие сжатия воспринималось упругим элементом, на который наклеены тензометрические датчики, подключенные к измерительному самопищущему потенциометру типа КСП-4. Деформацию образца регистрировали резистором переменного сопротивления, подключенного к самопищущему потенциометру также типа КСП-4.

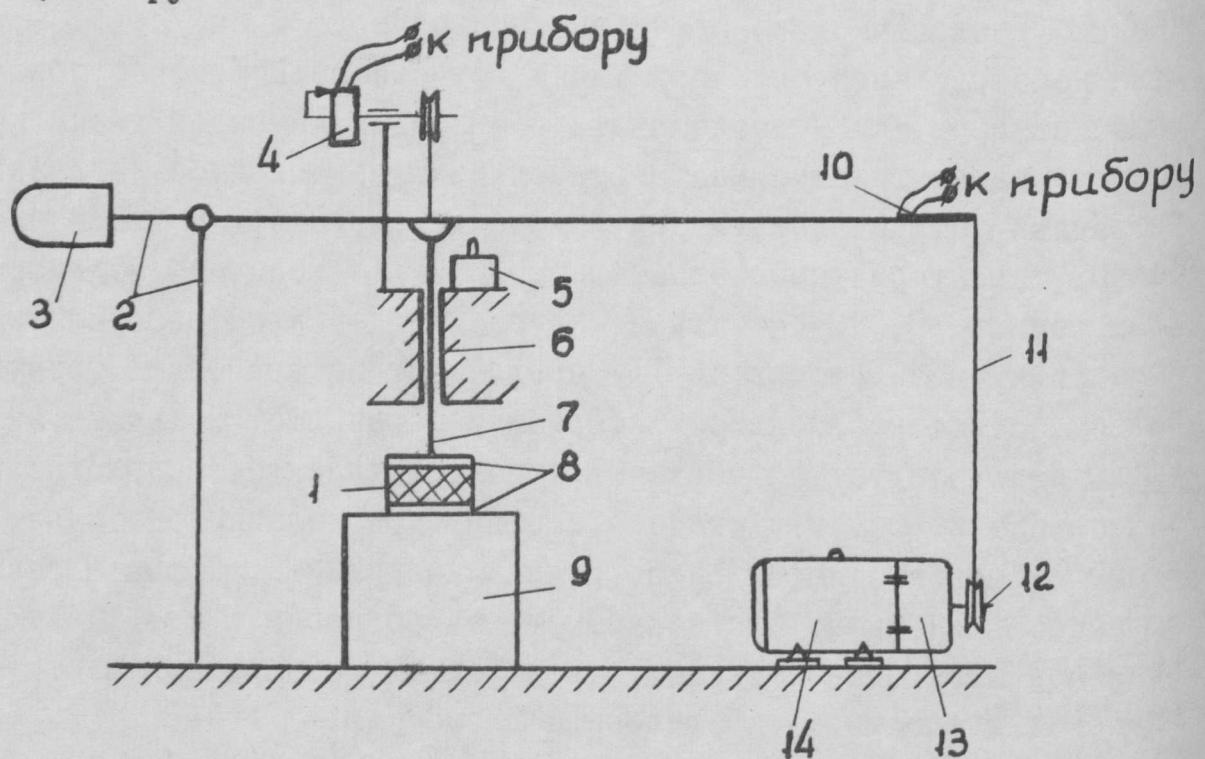


Рис. I. Принципиальная схема пластометра:
 I - образец; 2 - рычажная система; 3 - противовес; 4 - резистор переменного сопротивления; 5 - концевой выключатель; 6 - направляющие; 7 - толкатель; 8 - полированные пластины; 9 - основание; 10 - тензобалка; 11 - гибкий тросик; 12 - шкив; 13 - редуктор; 14 - электродвигатель постоянного тока.

Осевое сжатие осуществляли в двух режимах – статическом и циклическом, в диапазоне нагрузок от 0 до $1,2 \cdot 10^5$ Па. Статическое нагружение производили 180 сек. при заданной нагрузке, после чего нагрузку снимали и исследовали характер восстановления деформированного образца. При изучении ползучести время выдержки образца под нагрузкой увеличивали до 300 секунд. В циклическом режиме время нагружения составляло 2 секунды.

Характер деформации образца при статическом нагружении и последующее восстановление до первоначального состояния показаны на примере кривой $\varepsilon = f(t)$, приведенной на рис. 2, при значении $\sigma = 0,11 \cdot 10^5$ Па. Как видно из графика, общую деформацию образца $\varepsilon_{общ}$ в любой момент времени t можно представить в виде суммы трех составляющих:

$$\varepsilon_{общ} = \varepsilon_{упр} + \varepsilon_{эл} + \varepsilon_{пл}, \quad (1)$$

где $\varepsilon_{упр}$ – мгновенная упругая деформация;

$\varepsilon_{эл}$ – эластическая (релаксационная) деформация;

$\varepsilon_{пл}$ – пластическая остаточная деформация.

В свою очередь, $\varepsilon_{пл}$ представлена в виде суммы двух слагаемых:

$$\varepsilon_{пл} = \varepsilon_{пл}^{мгн} + \varepsilon_{пл}^{нат}, \quad (2)$$

где $\varepsilon_{пл}^{мгн}$ – мгновенная пластическая деформация;

$\varepsilon_{пл}^{нат}$ – натекающая пластическая деформация.

Мгновенная пластическая деформация является результатом микропластических деформаций, происходящих вследствие смещения мышечных волокон по всему объему образца, натекающая пластическая деформация связана с отделением тканевой жидкости и последующим уплотнением структуры, мгновенная упругая деформация и эластическая – с вязко-упругими свойствами материала в целом, упругостью соединительной ткани и вязкостью тканевой жидкости.

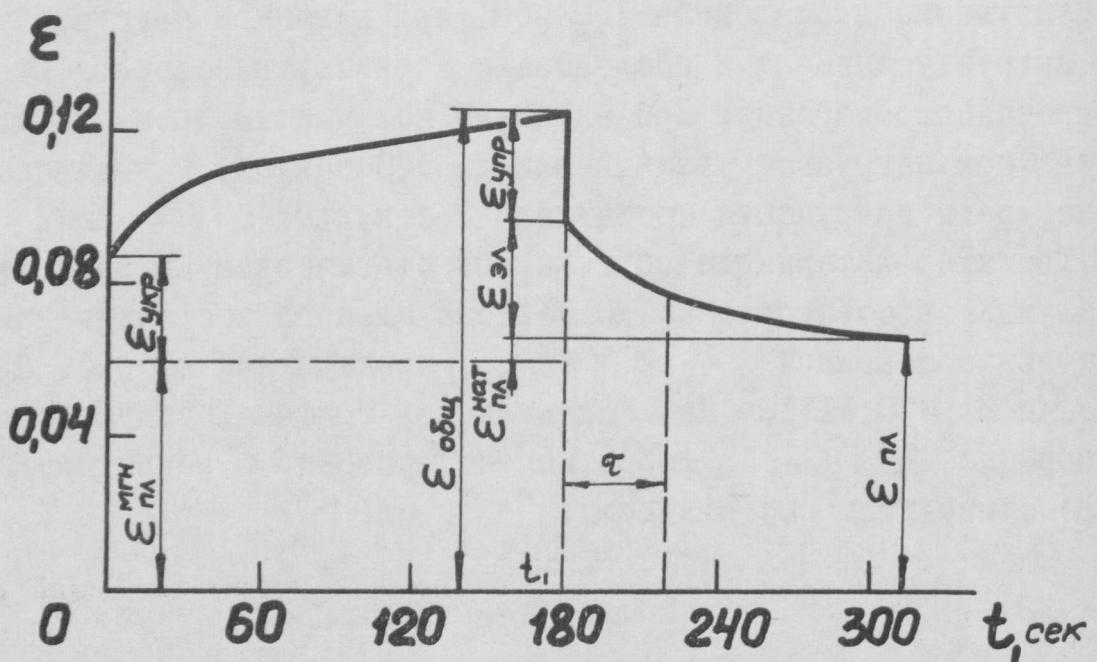


Рис. 2. Характерный пример деформационного поведения образцов мяса при осевом сжатии
($\sigma = 0,11 \cdot 10^5$ Па)

$t_1 = 180$ сек. — момент снятия внешней нагрузки

Для выяснения характера зависимости различных составляющих деформации от величины приложенной нагрузки были сняты кривые ползучести (рис. 3), а также проведены испытания образцов в циклическом режиме нагружения. Анализ этих кривых показал, что при достаточно продолжительном времени нагружения, скорость деформации стремилась к постоянному пределу (при заданной нагрузке) и линейно зависела от величины приложенной нагрузки. Общая деформация образца, взятая для одинаковых моментов времени на кривых ползучести, нелинейно зависела от величины нагрузки (рис. 4, кривые I-5). При нагрузках до $0,8 \cdot 10^5$ Па податливость образцов постепенно уменьшалась, затем при $\sigma = 0,8 \cdot 10^5$ Па — резко увеличивалась, что свидетельствовало о начале локального разрушения волокон. Из рис. 4 видно, что релаксационная составляющая деформации $\epsilon_{\text{рел}}$ и натекающая пластическая деформация $\epsilon_{\text{нат}}$ линейно зависят от σ .

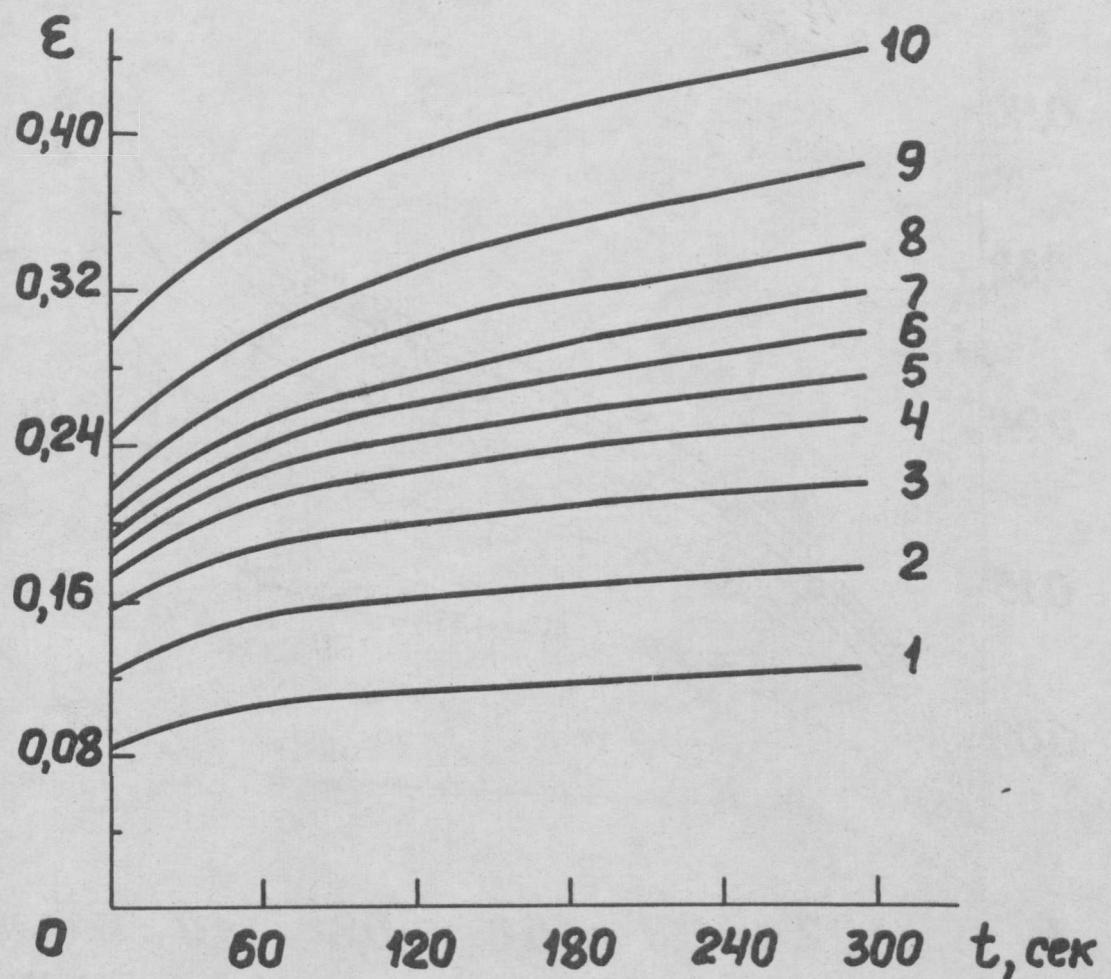


Рис. 3. Кривые ползучести при постоянной нагрузке:
значения $\sigma \cdot 10^5$ Па: I - 0,11; 2 - 0,22; 3 - 0,33; 4 - 0,44;
5 - 0,55; 6 - 0,66; 7 - 0,78; 8 - 0,89;
9 - 1,00; 10 - 1,11

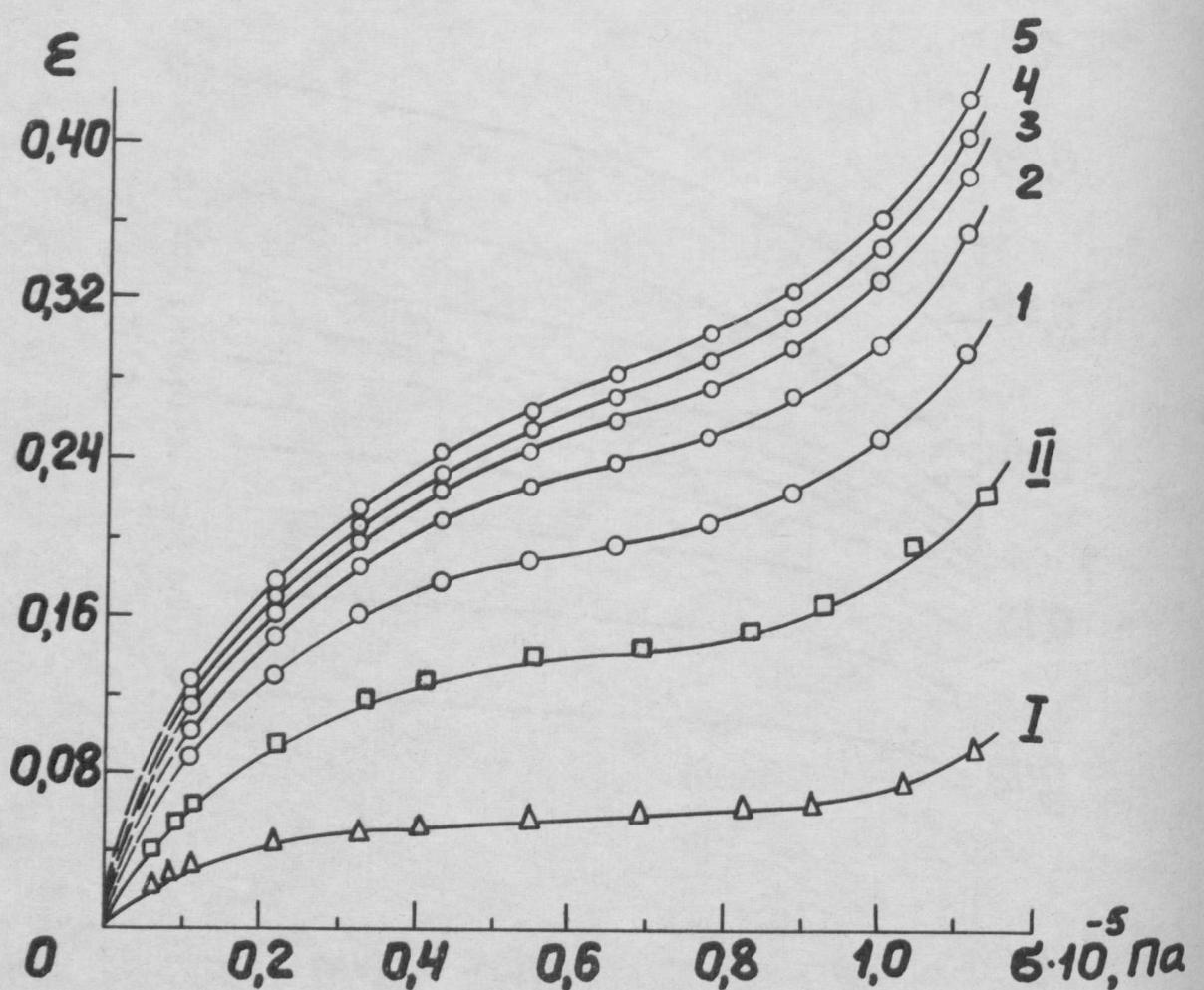


Рис. 4. Зависимость общей деформации от величины приложенной нагрузки для одинаковых моментов времени t , сек:
 I - 0; 2 - 60; 3 - 120; 4 - 180; 5 - 240
 Мгновенная упругая деформация I и мгновенная пластическая деформация II, как функции приложенного напряжения

По данным, полученным в режиме циклического нагружения, найдено, что как $\Sigma_{упр}$, так и $\Sigma_{пл}^{МГН}$ нелинейно зависят от величины приложенной нагрузки (кривые I и II на рис. 4). Поскольку эти составляющие деформации не зависят от t , общую связь $\Sigma_{упр}$ и $\Sigma_{пл}^{МГН}$ от σ можно представить в виде:

$$\Sigma_{упр}(\sigma) = \frac{\sigma}{E_I(\sigma)}; \quad (3)$$

$$\Sigma_{пл}^{МГН}(\sigma) = \frac{\sigma}{E_{II}(\sigma)}, \quad (4)$$

где $E_I(\sigma)$ – эффективный модуль упругости;

$E_{II}(\sigma)$ – эффективный модуль мгновенной пластичности.

В системе координат $\frac{\sigma}{\Sigma}(\sigma)$ зависимости (3) и (4), в интервале нагрузок от 0 до $0,85 \cdot 10^5$ Па, могут быть приведены к линейному виду, т.е.:

$$\frac{\sigma}{\Sigma_{упр}(\sigma)} = \frac{\alpha_I}{A_I} \sigma + \frac{1}{A_I} \quad \text{или} \quad \Sigma_{упр}(\sigma) = \frac{A_I \sigma}{1 + \alpha_I \sigma}; \quad (5)$$

$$\frac{\sigma}{\Sigma_{пл}^{МГН}(\sigma)} = \frac{\alpha_{II}}{A_{II}} \sigma + \frac{1}{A_{II}} \quad \text{или} \quad \Sigma_{пл}^{МГН}(\sigma) = \frac{A_{II} \sigma}{1 + \alpha_{II} \sigma}, \quad (6)$$

где A_I , A_{II} , α_I и α_{II} – некоторые постоянные величины.

Сравнивая (3-4) и (5-6) найдем:

$$E_I(\sigma) = \frac{1}{A_I} (1 + \alpha_I \sigma); \quad (7)$$

$$E_{II}(\sigma) = \frac{1}{A_{II}} (1 + \alpha_{II} \sigma). \quad (8)$$

Подставляя в формулы (7) и (8) численные значения постоянных величин, соответствующие условиям эксперимента, будем иметь:

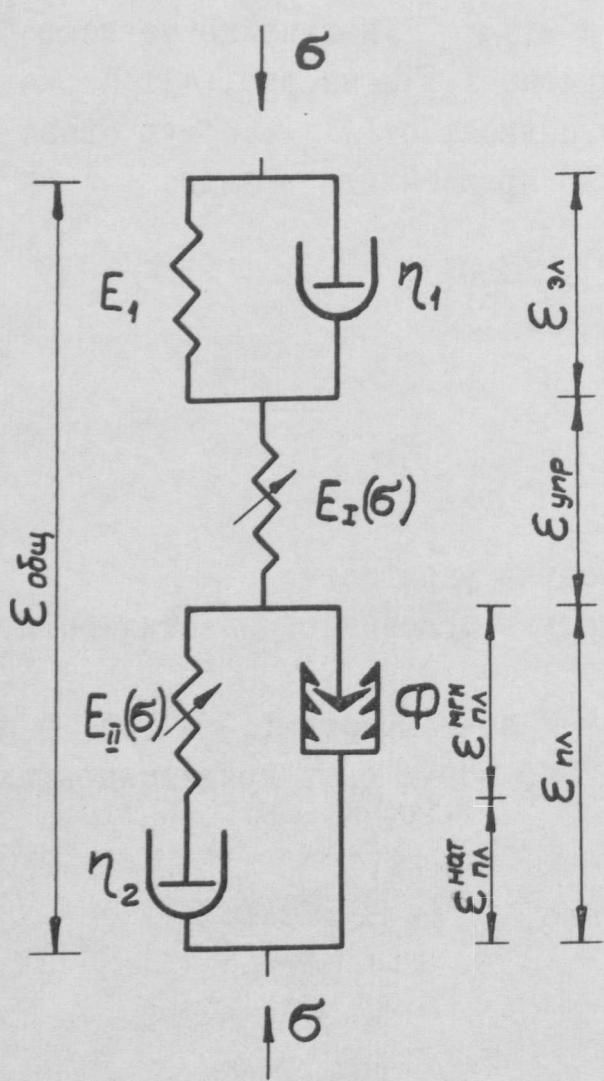


Рис. 5. Нелинейная реологическая модель неразрушенной мышечной ткани

жение. При большей нагрузке элемент вновь деформировался необратимо. Связь между деформацией $\varepsilon_{пл}$ и напряжением σ определяли через параметры $E_{II}(\sigma)$ и η_2 и зависела от предыстории процесса деформирования. Демпфер η_2 обеспечивал накапливающую во времени пластическую деформацию $\varepsilon_{пл}^{нат}$ и при снятии внешней нагрузки обеспечивал релаксацию остаточных напряжений на пружине $E_{II}(\sigma)$, так что в целом модель оказалась свободной от внутренних ("замороженных") напряжений.

$$E_I(\sigma) = 2,5 \cdot 10^5 + 15\sigma, \text{ Па} \quad (9)$$

$$E_{II}(\sigma) = 1,25 \cdot 10^5 + 5\sigma, \text{ Па} \quad (10)$$

На основании полученных опытных данных может быть предложена нелинейная реологическая модель неразрушенной мышечной ткани (рис. 5). В состав модели входят следующие элементы: Кельвина (E_I , η_1), обеспечивающий релаксационную составляющую деформации $\varepsilon_{эл}$, нелинейный упругий $E_I(\sigma)$ и нелинейный Максвелловский ($E_{II}(\sigma)$, η_2), шунтированный фиксатором Φ ; последний обеспечивает остаточную пластическую деформацию $\varepsilon_{пл}$. При приложении нагрузки шток фиксатора свободно перемещался вниз, при снятии нагрузки лепестки фиксатора заходили в пазы и не давали пружине $E_{II}(\sigma)$ принять первоначальное положение. При большей нагрузке элемент вновь деформировался необратимо. Связь между деформацией $\varepsilon_{пл}$ и напряжением σ определяли через параметры $E_{II}(\sigma)$ и η_2 и зависела от предыстории процесса деформирования. Демпфер η_2 обеспечивал накапливающую во времени пластическую деформацию $\varepsilon_{пл}^{нат}$ и при снятии внешней нагрузки обеспечивал релаксацию остаточных напряжений на пружине $E_{II}(\sigma)$, так что в целом модель оказалась свободной от внутренних ("замороженных") напряжений.

Общая деформация модели представлена в виде соотношений (I) и (2), деформации нелинейных элементов $\dot{\varepsilon}_{упр}$ и $\dot{\varepsilon}_{нл}^{МГН}$ в зависимости от приложенного напряжения σ , - формул (3) и (4), соответственно.

Для остальных элементов модели, например /12/

$$\eta_1 \dot{\varepsilon}_{эл} + E_1 \varepsilon_{эл} = \sigma'; \quad (II)$$

$$\dot{\varepsilon}_{нл}^{нат} = \frac{\sigma}{\eta_2}. \quad (I2)$$

Исключая из формул (I-4), (II) и (I2) частные деформации $\dot{\varepsilon}_{упр}, \dot{\varepsilon}_{нл}^{МГН}, \dot{\varepsilon}_{эл}, \dot{\varepsilon}_{нл}^{нат}$ получили следующее нелинейное дифференциальное реологическое уравнение второго порядка относительно σ' и ε :

$$\tau \frac{d^2\varepsilon}{dt^2} + \frac{d\varepsilon}{dt} = \tau \frac{d^2}{dt^2} \left[\frac{\sigma}{E(\sigma)} \right] + \frac{d}{dt} \left[\frac{\sigma}{E(\sigma)} \right] + \frac{\tau}{\eta} \frac{d\sigma}{dt} + \frac{\sigma}{\eta_2}, \quad (I3)$$

где

$$E(\sigma) = \frac{E_I(\sigma) \cdot E_{II}(\sigma)}{E_I(\sigma) + E_{II}(\sigma)} - \quad (I4)$$

- приведенный нелинейный модуль упругости;

$$\eta = \frac{\eta_1 \cdot \eta_2}{\eta_1 + \eta_2} - \quad (I5)$$

- приведенный коэффициент вязкости;

$$\tau = \frac{\eta_1}{E_1} - \quad (I6)$$

- время релаксации деформации.

Применим полученное уравнение для исследования ползучести при постоянной нагрузке. При $\sigma = const$, уравнение (I3) принимало вид:

$$\tau \ddot{\varepsilon} + \dot{\varepsilon} = \frac{\sigma}{\eta_2} \quad (I7)$$

Это линейное неоднородное дифференциальное уравнение второго порядка с постоянной правой частью.

Начальные условия (при $t = 0$) имели вид:

$$\varepsilon(0) = \frac{\zeta'}{E_I(\zeta)} + \frac{\zeta}{E_{II}(\zeta)} = \frac{\zeta'}{E(\zeta)}; \quad (I8)$$

$$\dot{\varepsilon}(0) = \frac{\zeta}{\eta_1} + \frac{\zeta}{\eta_2} = \frac{\zeta}{\eta}. \quad (I9)$$

Решение уравнения (I7) с начальными условиями (I8) и (I9) будет:

$$\varepsilon(t) = \frac{\zeta}{E(\zeta)} + \frac{\zeta}{\eta_2} t + \frac{\zeta}{E_I} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right). \quad (20)$$

Дифференцируя (20) по времени t , и переходя к пределу при $t \rightarrow \infty$, находили, что для предельной скорости ползучести:

$$\dot{\varepsilon}(\infty) = \frac{\zeta}{\eta_2} \quad (21)$$

С помощью уравнения (I3) исследовали характер восстановления деформации, после снятия внешней нагрузки в момент времени t_1 (см. рис. 2). В этом случае вместо (I7) будем иметь (при $\zeta = 0$):

$$\tau \ddot{\varepsilon} + \dot{\varepsilon} = 0. \quad (22)$$

Начальную деформацию модели определяли из предыдущего решения при $t = t_1$, за вычетом мгновенной упругой деформации элемента $E_I(\zeta)$, она равнялась:

$$\varepsilon(t_1) = \frac{\zeta}{E_{II}(\zeta)} + \frac{\zeta}{\eta_2} t_1 + \frac{\zeta}{E_I} \left(1 - e^{-\frac{t_1}{\tau}}\right) \quad (23)$$

Начальную скорость определяли только начальной скоростью деформации элемента Кельвина /I2/:

$$\dot{\varepsilon}(t_1) = -\frac{\zeta}{\eta} \left(1 - e^{-\frac{t_1}{\tau}}\right). \quad (24)$$

Решив уравнение (22) с начальными условиями (23) и (24), получили:

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma}{E_1(\zeta)} + \frac{\zeta}{\zeta_2} t_1 + \frac{\zeta}{E_1} (e^{\frac{t_1}{\zeta}} - 1) e^{-\frac{t}{\zeta}} \quad (25)$$

Переходя к пределу при $t \rightarrow \infty$, находили для остаточной деформации $\varepsilon_{ост}(t_1)$, зависящей от момента снятия внешней нагрузки:

$$\varepsilon_{ост}(t_1) = \frac{\sigma}{E_1(\zeta)} + \frac{\zeta}{\zeta_2} t_1, \quad (26)$$

Феноменологические постоянные E_1 , ζ , и ζ_2 и время релаксации деформаций τ определяли, согласно приведенным решениям, по экспериментальным данным. Исходя из соотношения для предельной скорости ползучести (21) и данных, приведенных на рис. 3, находили для коэффициента вязкости ζ_2 значения порядка $5,2 \cdot 10^8$ Па·сек. Время релаксации τ , найденное по кривым восстановления (см. рис. 2) оказалось равным примерно 45 сек., тогда в соответствии с решением уравнения (25) находим, что $E_1 \approx 3,8 \cdot 10^5$ Па. Второй коэффициент вязкости ζ , определяли согласно формуле (16), как $\tau \cdot E_1$, и он был равен $1,7 \cdot 10^7$ Па·сек.

Полученные объективные данные, характеризующие структуру мышечной ткани, могут быть использованы не только для технологических целей, но и для оценки некоторых аспектов качества продукта.

ЛИТЕРАТУРА

1. Соколов А.А. Физико-химические и биохимические основы технологии мясопродуктов. М., изд. "Пищевая промышленность", 1965.
2. Рогов И.А., Горбатов А.В. Новые физические методы обработки мясопродуктов. М., изд. "Пищевая промышленность", 1966.
3. Горбатов А.В. Реология в мясной промышленности, М., ЦНИИТЭИмясомолпрома СССР, 1968.

4. Потокин В.А. Механическое оборудование предприятий общественного питания. М., Госторгиздат, 1940.
5. Клименко М.Н. Канд.дисс. М., МТИММП, 1966.
6. Спирин Г.Е. Канд.дисс. М., МТИММП, 1970.
7. Пелев А.И. Пути механизации обвалки мяса. М., ЦНИТИПищепром, 1970.
8. Познышев А.Н. Тезисы докладов конференции молодых специалистов института по итогам научно-исследовательских работ. М., МТИММП, 1972, 146.
9. Stanley D.W., Pearson G.P. and Conworth V.E. "J. of Food Science", 36, 2, 1971, 256.
10. Moshenin N.N., Physical properties of plant and animal materials. v.1. New-York, London, Paris, 1970.
11. Бендолл Дж. Мышцы, молекулы и движение. М., изд. "Мир", 1970.
12. Гольберг И.И. Механическое поведение полимерных материалов. М., изд. "Химия", 1970.