

Научная статья

УДК 541.182; 532.7; 664.3

DOI: 10.17586/2310-1164-2025-18-3-27-36

Моделирование течения маслосодержащего материала в каналах прессующего тракта маслопресса. Часть 1. Распределение давления

И.А. Старков¹, Г.Е. Мельник^{1*}, А.С. Старков², Д.А. Лисицын¹¹ВНИИЖиров, Россия, Санкт-Петербург²Университет ИТМО, Россия, Санкт-Петербург

*genmelnik@yandex.ru

Аннотация. Исследовали распределение давления и механизм разрушения частиц маслосодержащего материала при его течении в каналах прессующего тракта шнекового маслопресса, включающих конфузорные участки. Конфузоры, представляющие собой плавно сужающиеся каналы, играют ключевую роль в увеличении скорости течения материала и формировании значительных градиентов давления. Численное моделирование выполнено в программном пакете COMSOL Multiphysics с использованием модуля ламинарного течения (Laminar Flow) для стационарного режима. Уравнение Навье–Стокса дополнено моделью Кросса–Вильямсона для учета неньютоновского поведения материала. Показано, что градиент давления в конфузорных каналах может достигать 20 МПа/м, что в 50 раз превышает значения для цилиндрических каналов без сужения. Такие высокие градиенты давления способствуют интенсивному разрушению частиц ядра семян за счет деформаций сдвига. Анализ упругих полей в шарообразных частицах подтвердил, что градиент давления существенно снижает критическое давление, необходимое для их разрушения. Практическая значимость работы заключается в возможности оптимизации конструкции маслопрессов для повышения эффективности измельчения материала и увеличения выхода масла. Полученные данные также вносят вклад в развитие методов моделирования течений в сужающихся каналах для неньютоновских жидкостей.

Ключевые слова: механика течения материала; растительные пищевые масла; численное моделирование; каналы прессующего тракта; конфузор

Original article

Modeling of oil-containing material flow in the channels of the pressing path of an oil press Part 1. Pressure distribution

Ivan A. Starkov¹, Gennady E. Melnik^{1*}, Alexander S. Starkov², Dmitry A. Lisitsyn¹¹All-Russian Research Institute of Fats, St. Petersburg, Russia²ITMO University, St. Petersburg, Russia

*genmelnik@yandex.ru

Abstract. This study investigates the pressure distribution and the mechanism of particle destruction in oil-containing material flowing through the channels of a screw oil press, including confuser sections. Confusers, which are smoothly narrowing channels, play a key role in increasing the flow velocity and generating significant pressure gradients. Numerical modeling was performed using COMSOL Multiphysics software with the Laminar Flow module for a stationary regime. The Navier–Stokes equation was supplemented with the Cross–Williamson model to account for the non-Newtonian behavior of the material. The results revealed that the pressure gradient in confuser channels can reach 20 MPa/m, which is 50 times higher than in cylindrical channels without narrowing. Such high-pressure gradients promote intense destruction of seed kernel particles due to shear deformations. Analysis of elastic fields in spherical particles confirmed that the pressure gradient significantly reduces the critical pressure required for their destruction. The practical significance of the work is the possible optimization of oil press designs for improved material grinding efficiency and increased oil yield. The obtained data also contribute to the development of flow modeling methods in narrowing channels for non-Newtonian fluids.

Keywords: flow mechanics of material; vegetable edible oils; numerical modeling; pressing tract channels; confuser

Введение

В настоящее время для производства растительного масла из масличного сырья прессованием применяются два различных способа. Первый – традиционный, при котором перед прессованием семена (или ядро семян) тщательно измельчают и подвергают влаготепловой обработке. Второй – масличное сырье не подвергается операции измельчения; после влаготепловой обработки в маслопрессе с совмещением процессов измельчения материала и отжима масла вырабатывается пресловое масло.

Учитывая, что все крупные маслодобывающие предприятия России укомплектованы маслопрессами с реализацией второго способа прессования, закономерности поведения маслосодержащего материала в каналах рабочей зоны маслопресса исследуются в двух направлениях. Однако, если традиционному направлению уделено значительное количество трудов и публикаций [1–5], то второе в этом отношении существенно уступает [6–9].

Ранее авторы [9] рассматривали некоторые особенности совмещенного процесса измельчения масличного материала и отжима масла в шнековом прессе, но рамки статьи не позволили описать его механизм более полно и поэтому в настоящей работе продолжено исследование закономерностей течения масличного материала в каналах рабочей зоны шнекового пресса с учетом их специфических особенностей. Из рисунка 1, опубликованного [9] следует, что наружной поверхностью каждого из конусов 2 и внутренней поверхностью зернового цилиндра 4 образуется не что иное, как кольцевой конфузор – плавно сужающийся участок канала. Особенности течения жидкости в конфузоре приводятся в [10]. Л.Д. Ландау и Е.М. Лифшиц рассматривают стационарное конфузорное течение вязкой жидкости между двумя плоскими стенками, наклоненными друг к другу под углом, в цилиндрических координатах. Течение жидкости полагается по оси вдоль линии, симметрично делящей угол раствора (раскрытия) плоскостей; жидкость в такой конфузорной модели течет в направлении пересечения сходящихся в вершине угла плоскостей и оси симметрии. При больших числах Рейнольдса течение в конфузоре почти не отличается от течения идеальной жидкости. Влияние вязкости проявляется в очень тонком слое вблизи стенок, где происходит быстрое падение скорости течения до нуля.

В монографии [7] Ю.А. Толчинским с соавторами описано течение материала в канале, включающем конфузор. Для вычисления расходно-напорных характеристик в конфузоре предложено решение задачи о течении ньютоновской высоковязкой жидкости в канале прямоугольного поперечного сечения под действием давления с применением уравнения течения и непрерывности в стоксовском приближении.

В работе [11] изучена напорно-расходная зависимость для течения расплава полимера в круглом конфузоре. В пределах изменения параметров переработки материал ведет себя как ньютоновская жидкость с вязкостно-температурной зависимостью. Аналитическими решениями показано хорошее совпадение с численным решением при параметрах: производительность $Q = 0,5 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3/\text{с}$, вязкость $\mu(T_0) = 10^3 \cdot \text{Па} \cdot \text{с}$, температура $T_0 = 373 \text{ К}$.

В.Г. Лушиком с соавторами [12] выполнено численное исследование течения в плоском диффузоре и конфузоре. Изучение влияния угла раскрытия (сужения) в диффузоре (конфузоре) показало, что при одинаковом по модулю угле в конфузоре сопротивление существенно выше, чем в диффузоре, и оно возрастает с увеличением угла. Во второй их публикации [13] проведено численное моделирование течения в плоском канале с конфузуром и установлено, что только в случае достаточного времени воздействия градиента давления на течение величина параметра ускорения потока K может быть использована для определения условия полной ламинаризации течения. При этом значение K будет составлять $6 \cdot 10^{-6}$.

Для струеформирующего устройства, имеющего форму конфузора, авторами при выполнении исследований потерь напора в канале конфузора [14] получена зависимость для расчета оптимального угла конусности при турбулентном режиме движения в диапазоне чисел Рейнольдса $4 \cdot 10^3 < Re < 3 \cdot 10^6$ с учетом влияния плотности жидкости, динамической или кинематической вязкости, средней скорости движения, радиусов конфузора.

Анализ приведенных исследований показывает, что устройство типа «конфузор» успешно применяется в различных областях. Закономерности процессов, протекающие в нем, изучены достаточно глубоко. Обобщает многие работы тот факт, что в них независимо от класса материала, протекающего через устройство, рассматриваются напорно-расходные характеристики процесса. При этом отсутствуют данные о влиянии таких характеристик, как давление, создаваемое в маслосодержащем материале при прохождении в устройстве типа «конфузор», на процесс его измельчения, и механизм измельчения частиц маслосодержащего материала.

Цель работы – исследовать распределение давления при течении маслосодержащего материала в каналах прессующего тракта маслопресса, включающих конфузурные, и механизм разрушения частиц ядра семян подсолнечника.

Объекты и методы исследования

В качестве объекта исследования применяли модель каналов прессующего тракта шнекового маслопресса, включающих конфузорные, в которых происходит измельчение маслосодержащего материала.

Схема модели каналов представлена на рисунке 1. Элементы рабочих органов в зависимости от состава образуют три сложных канала различной конфигурации. Канал I образован наружной поверхностью шнеков 1 и 2, конуса 1 и внутренней поверхностью зернового цилиндра; часть канала на участке l_2 представляет собой конфузорный канал I. Канал II образован наружной поверхностью шнеков 2 и 3, конуса 2 и внутренней поверхностью зернового цилиндра; часть канала на участке l_4 – конфузорный канал II. Также изучалась система, образованная последовательным соединением каналов I и II – канал III.

Таким образом, в представленной модели конфузор – это часть прессующего тракта шнекового маслопресса, состоящая из конуса и участка зерновой камеры по длине конуса, коническо-цилиндрические (или конические) поверхности которых образуют кольцевой канал, по которому перемещается маслосодержащий материал. Такой объемный канал плавно сужается в направлении движения материала.

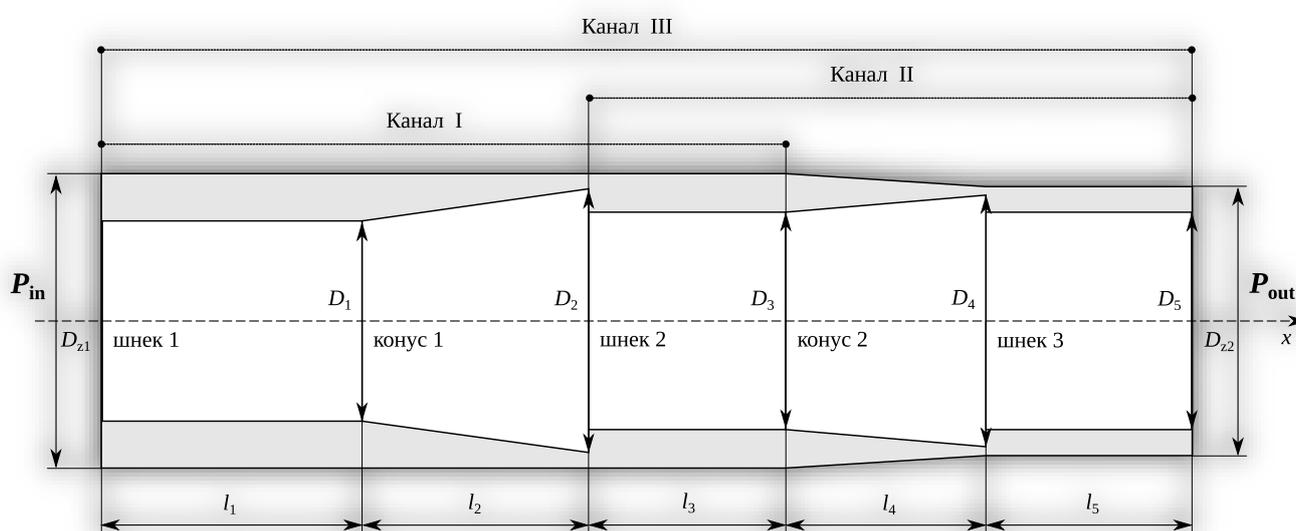


Рисунок 1 – Схема модели каналов прессующего тракта шнекового маслопресса
 Figure 1. Model of the channels for the pressing path of the screw oil press

Описание течения маслосодержащего материала в каналах прессующего тракта шнекового пресса, включающих конфузоры, очень сложна и получение численных выражений возможно при выполнении следующих условий и предположений:

1. область действия модели – часть прессующего тракта маслопресса, где материал консолидирован – представляет собой сплошную среду;
2. модель течения осесимметрична, что упрощает процедуры численного решения уравнений, описывающих систему;
3. маслосодержащий материал в канале отдельно взятого элемента является несжимаемым;
4. истечение масла из материала на всех участках каналов отсутствует;
5. все численные расчеты выполняются исключительно для конфузорных каналов;
6. в каналах допускается проскальзывание материала;
7. маслосодержащий материал моделируется вязкой жидкостью.

Для исследования гидродинамических процессов в конфузорных каналах маслопресса выполнено компьютерное моделирование с использованием модуля Laminar Flow программного комплекса COMSOL Multiphysics. Модуль специально разработан для анализа стационарных и нестационарных ламинарных течений несжимаемых и слабосжимаемых жидкостей. Физическая основа модуля базируется на решении полной системы уравнений Навье–Стокса, дополненной уравнением неразрывности.

Математическая формулировка задачи включает в себя уравнение сохранения импульса, где учитываются инерционные, вязкие и градиентные составляющие, а также уравнение сохранения массы, гарантирующее выполнение условия несжимаемости течения.

Особенность данного исследования – применение модели Кросса–Вильямсона для описания реологических свойств маслосодержащего материала. Это позволило учесть зависимость эффективной вязкости от скорости сдвига, что особенно важно для корректного описания поведения неньютоновских жидкостей в условиях изменяющейся геометрии канала. Параметры модели подобраны на основе экспериментальных данных, обеспечив достоверность получаемых результатов. Процесс моделирования начинали с построения точной геометрической модели конфузورных каналов, параметры которых соответствовали реальным конструктивным особенностям промышленного маслопресса.

Для модели каналов приняты следующие геометрические параметры: $l_1 = 0,115$ м; $l_2 = 0,100$ м; $l_3 = 0,098$ м; $l_4 = 0,090$ м; $l_5 = 0,090$ м; $D_{z1} = 0,130$ м; $D_{z2} = 0,118$ м; $D_1 = 0,090$ м; $D_2 = 0,121$ м; $D_3 = 0,099$ м; $D_4 = 0,112$ м; $D_5 = 0,095$ м.

Дискретизация расчетной области выполнена с использованием метода конечных элементов с адаптивным сгущением сетки в зонах ожидаемых высоких градиентов скорости и давления. Особое внимание уделяли области вблизи стенок конфузора, где формируются наиболее существенные изменения гидродинамических параметров. Расчетную сетку строили с использованием триангуляции Делоне, она состояла из $4,3 \cdot 10^6$, $3,2 \cdot 10^6$ и $6,9 \cdot 10^6$ элементов для канала I, II и III соответственно. Подобное количество разбиений вычислительной области обеспечивает минимальное отклонение результатов при дальнейшем увеличении числа элементов сетки ($\sim 0,1\%$) и минимизации влияния численной диффузии.

Граничные условия сформулировали следующим образом: на входе в канал задавали постоянное давление 100 кПа ($P_{in} = 100$ кПа), на выходе – 300 кПа ($P_{out} = 300$ кПа), что создавало направленный поток материала через систему каналов. На твердых стенках учитывали условие проскальзывания с длиной 0,5 мкм, что позволило более реалистично описать взаимодействие вязкого материала с поверхностями оборудования. Для решения системы уравнений использовали стационарный решатель с автоматическим выбором шага итераций и контролем сходимости.

Валидацию численной модели проводили путем сравнения с известными аналитическими решениями для упрощенных геометрий, а также с экспериментальными данными, приведенными в литературных источниках. Оптимальное соответствие результатов подтвердило адекватность выбранных модельных предположений и корректность методики расчета.

Результаты и их обсуждение

Исследование распределения давления. Движение маслосодержащей смеси описывали уравнением Навье–Стокса [9, 15], которое для вязкой несжимаемой жидкости записывается в виде

$$\frac{\partial u}{\partial t} + (u \cdot \nabla)u = \eta \Delta u - \frac{1}{\rho} \nabla p,$$

где u – вектор скоростей, м/с;

t – время, с;

p – давление, Па;

η – кинематическая вязкость, м²/с;

ρ – плотность жидкости, кг/м³;

Δ – векторный оператор Лапласа, м⁻².

Наряду с кинематической вязкостью использовали динамическую вязкость μ , Па·с, которая связана с η соотношением $\mu = \rho\eta$. Поскольку вязкость маслосодержащего материала зависит от скорости, то такой материал в первом приближении можно относить к неньютоновскому классу материалов. Из множества моделей неньютоновских жидкостей выберем модель Кросса–Вильямсона [15, 16], как обеспечивающую наибольшую точность в аппроксимации экспериментальных данных. Зависимость динамической вязкости от скорости имеет вид

$$\mu = \mu_0 (1 + \lambda \dot{\gamma})^{n-1},$$

где μ_0 – вязкость при нулевом сдвиге (ньютоновский предел), Па·с, т.е. значение, к которому стремится вязкость при очень низких скоростях сдвига;

λ – постоянная времени, которая определяется из наилучшего соответствия экспериментальным зависимостям, с;

$\dot{\gamma}$ – скорость сдвига, с^{-1} .

В качестве физических параметров при выполнении численных расчетов выбрали соответствующие значения из [15].

Поскольку на стенках каналов прессующего тракта маслопресса рассматривается условие проскальзывания потока жидкости, включающее в расчеты скорость проскальзывания [16], наличие данной скорости может быть объяснено нарушением предположения о непрерывности вязкости. Граничное условие проскальзывания связывает скачок тангенциальной скорости, вызванный вязкостью, с касательным напряжением сдвига вдоль границы

$$\Delta u = \frac{L_s}{\mu} \tau_{n,t},$$

где $\tau_{n,t}$ – касательное напряжение сдвига на границе, Па;

L_s – длина проскальзывания, м, которая характеризует расстояние от границы до виртуальной точки вне области потока, где профиль потока экстраполируется к нулю. При проведении моделирования длина проскальзывания выбрана равной $L_s = 0,5$ мкм [15]. Четких объяснений механизма эффекта проскальзывания у нас нет. Вместе с тем интересная трактовка проскальзывания материала при его измельчении приводится Г.С. Ходаковым [16], отметившим, что если в помольную среду входит поверхностно-активное вещество, то поступательное перемещение частиц измельчаемого материала будет замедлено так называемым «проскальзыванием», и в конечном счете снизит эффективность измельчения. Доводы автора применимы и для нашего случая, если учесть, что маслосодержащий материал включает растительное масло, обладающее поверхностно-активными свойствами, и влагу; такие свойства могут способствовать проскальзыванию маслосодержащего материала при течении в конфузورных каналах прессующего тракта маслопресса, степень воздействия которого предстоит выяснить.

В результате численных расчетов получили распределение давления и градиента давления в исследуемых конфузорных каналах. Графики полученных распределений градиента давления для одиночного конфузорного канала представлены на рисунках 2 и 3.

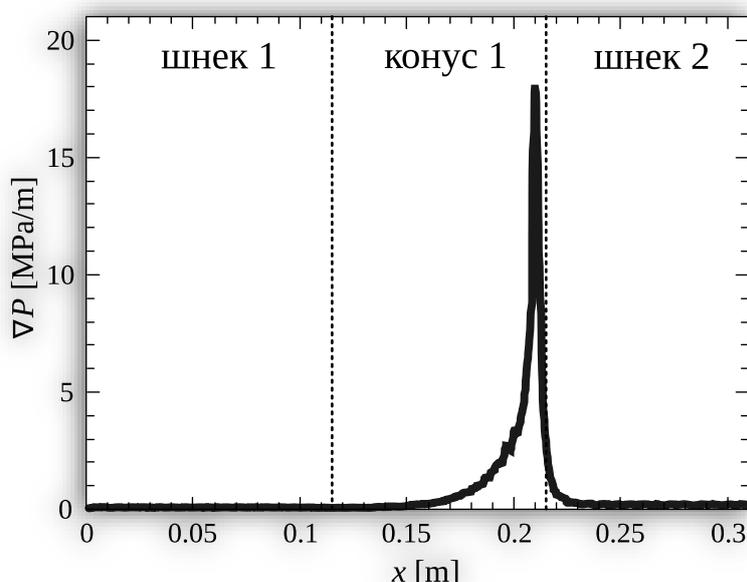


Рисунок 2 – Распределение градиента давления в канале I (с одним конфузорным каналом I)
 Figure 2. Distribution of pressure gradient in channel I (with one confuser channel I)

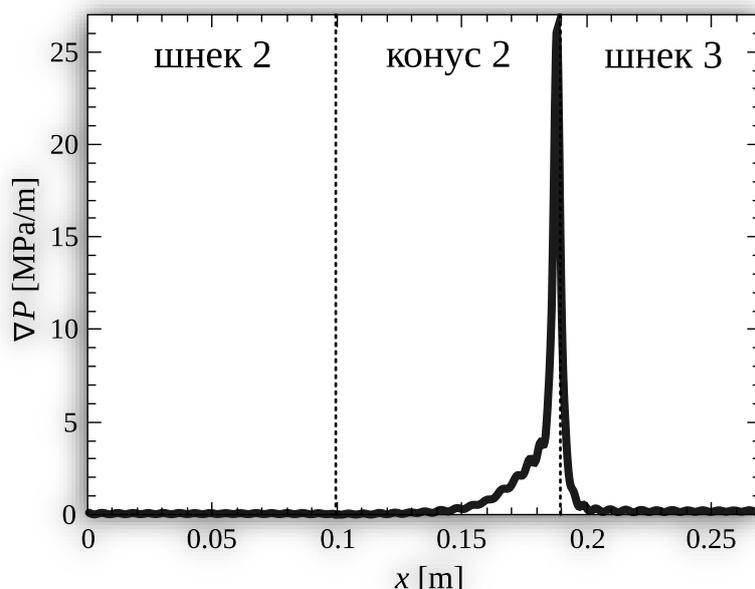


Рисунок 3 – Распределение градиента давления в канале II (с одним конфузурным каналом II)
 Figure 3. Distribution of pressure gradient in channel II (with one confuser channel II)

На рисунке 4 представлена графическая интерпретация распределения градиента давления для сложного канала III, включающего два конфузурных канала – I и II. Вблизи границы конфузурного канала II наблюдается значительное увеличение градиента давления, достигающего 20 МПа/м, вызванного сужением канала и общим увеличением давления. Тем не менее, полного объяснения полученному результату у авторов пока что нет.

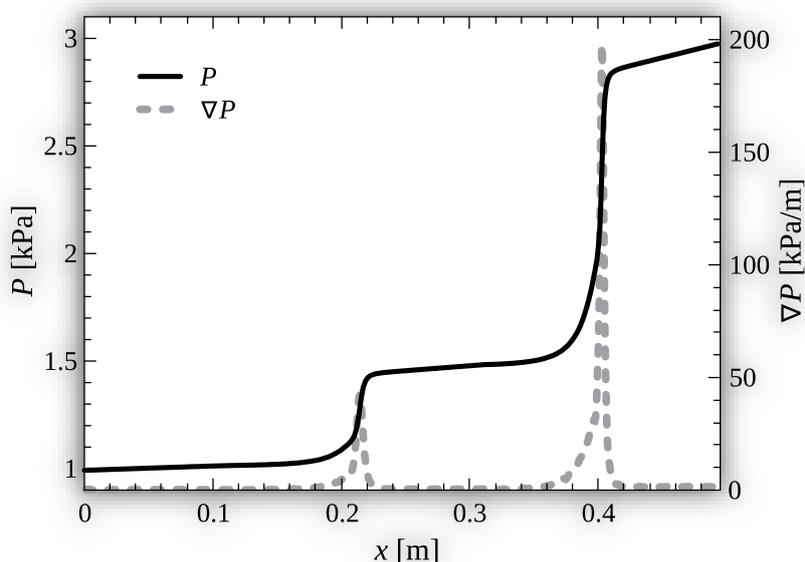


Рисунок 4 – Распределение градиента давления в канале III (с конфузурными каналами I и II)
 Figure 4. Distribution of pressure gradient in channel III (with confuser channels I and II)

Отмечается, что координатная зависимость давления не является линейной, что указывалось в работах [17, 18]. Градиент давления, который достаточно мал вдали от границы конфузурного канала, наибольшие значения принимает вблизи нее.

Наличие конфузуров приводит к развитию процесса измельчения частиц маслосодержащего материала, перемещающегося по конфузурным каналам. Это связано с увеличением скорости движения материала по каналу и усилением столкновений между частицами. Процесс измельчения нарастает по направлению к выходу из конфузурного канала; наличие у конуса на выходе острой кромки (угол <math>< 90^\circ</math>) способствует измельчению; однако на практике в связи с быстрым износом кромки такой формы

принято конус конфузоров изготавливать с участком поверхности цилиндрической формы на выходе. Но основное влияние на процесс измельчения, на наш взгляд, все же оказывает наличие областей с повышенным градиентом давления. Так, если для кольцевого цилиндрического канала с постоянными радиусами стенок средний градиент давления оценивается в 400 кПа/м, то в конфузурных каналах градиент давления достигает максимального значения в 20 МПа/м (рисунок 4). Таким образом, градиент давления у поверхности конфузора может увеличиваться примерно в 50 раз по сравнению с каналом без конфузора. Несомненно, что такой большой градиент сказывается и на измельчении частиц маслосодержащего материала из-за возникновения деформаций сдвига. Влияние градиента давления на распределение упругих полей в отдельной частице описывается в следующем разделе.

Задача упругости в шаре. Согласно модели [9], величина давления, необходимая для разрушения частиц ядра семян подсолнечника, обратно пропорциональна размеру частиц. Для простоты в дальнейшем форму частиц будем считать шарообразной с радиусом R , м. Изначально форма частицы ядра близка к эллипсоидальной, но в процессе разрушения приближается к шарообразной. Более точно разрушение частицы происходит, если величина смещения на ее поверхности превышает некоторое критическое значение. При смещении, большем критического, образуются трещина, которая быстро увеличивается и раскалывает частицу на части. Отсюда для условия гидростатического сжатия вытекает пропорциональность давления, при котором происходит разрушение, величине $1/R$. Если учитывать не только давление, но и его изменение, т. е. его градиент, смещение оказывается зависящим от двух указанных величин. Наибольший градиент, как показано выше, возникает у поверхностей конфузурных каналов, поэтому их влияние на разрушение частиц значительно.

Для количественного описания влияния градиента давления на процесс разрушения частиц ядра семян подсолнечника рассматривали упругий шар радиуса R , который помещали в начало системы координат. Шарообразная частица подвергалась внешнему давлению $p = p_0 + p_1 z$, линейно изменявшемуся вдоль координаты z . Величина p_0 , м, равна среднему давлению, которое действует на такую частицу, а p_1 , м, характеризует изменение давления. Неоднородность давления приводит к появлению деформации сдвига. Решение задачи упругости проводили в сферической системе координат (r, θ, φ) и разделяли на две части в соответствии с разделением внешнего давления. Решение задачи о равномерно сжатой шарообразной частице приведено в [19] и при заданной форме внешнего давления имеет вид

$$u_r = -\frac{1-2\sigma}{E} p_0 r,$$

где u_r есть радиальное смещение, м;

σ – коэффициент Пуассона, безразмерная величина;

E – модуль растяжения (модуль Юнга), Па.

Поскольку при приложении давления происходит уменьшение объема шара, то в правой части приведенной формулы стоит знак минус. Максимальное смещение имеет место на границе шара и его модуль равен

$$u_{r,\max} = (1-2\sigma)p_0 \frac{R}{E}.$$

Переходя к определению смещений для второго слагаемого, очевидно, что в этом случае у смещения есть две компоненты – u_r и u_θ , которые имеют вид

$$u_r = -\frac{p_1 R r}{E} \cos^2 \theta, \quad u_\theta = \frac{p_1 R r}{E} \cos \theta \sin \theta.$$

Отметим, что максимальные смещения в этом случае пропорциональны R^2 , наибольшее изменение радиальной составляющей происходит у полюсов шара, а наименьшее – на экваторе. Качественные оценки полученных выражений на основе проведенных вычислений и оценок упругих параметров материала из [9] с учетом градиента давления приводит к тому, что шар радиусом 1 мм разрушается при вдвое меньшем давлении, чем такой же шар при постоянном давлении. В реальных задачах вклад градиента давления может быть существенно выше. Такое увеличение связано с появлением второй компоненты вектора смещения – u_θ . Можно предположить, что для достижения

смещения, при котором происходит разрушение частиц ядра, при гидростатическом сдавливании и растяжении вдоль поверхности следует приложить различные силы, меньшие в случае растяжения. Из-за этого влияние смещения u_0 может быть сильнее, чем u_r . Важную роль в процессе разрушения и измельчения играют дефекты в структуре измельчаемых частиц, являющиеся фактором, влияющим на развитие процесса измельчения.

Заключение

Численным моделированием подтверждено, что в конфузорных каналах прессующего тракта маслопресса градиент давления достигает 20 МПа/м, что в 50 раз превышает значения для цилиндрических каналов без сужения. Это связано с плавным сужением канала, которое увеличивает скорость течения материала и создает значительные градиенты давления.

Высокие градиенты давления способствуют интенсивному разрушению частиц ядра семян подсолнечника за счет деформаций сдвига. Анализ упругих полей в шарообразных частицах показал, что градиент давления существенно снижает критическое давление, необходимое для их разрушения, что подтверждает эффективность конфузорных участков в процессе измельчения.

Использование модели Кросса–Вильямсона в программном пакете COMSOL Multiphysics позволило учесть неньютоновское поведение маслосодержащего материала и получить достоверные результаты. Методология исследования может быть применена для дальнейшего изучения течений в сужающихся каналах для других неньютоновских жидкостей.

Для более полного понимания механизма разрушения частиц и влияния градиента давления необходимо дальнейшее изучение, включая экспериментальную валидацию модели и анализ влияния других факторов, например температуры и влажности материала.

Новая трактовка механизма разрушения масличного материала в конфузорных каналах прессующего тракта шнекового маслопресса вносит научный вклад в понимание совмещенного процесса измельчения масличного материала и отжима масла, открывая дополнительные возможности для его оптимизации.

Полученные результаты имеют практическую значимость для совершенствования конструкции современных маслопрессов. Учет влияния градиента давления позволяет повысить эффективность измельчения материала и отжима масла, что особенно важно для современных технологий переработки выращиваемого в России масличного сырья.

Литература

1. Vadke V.S., Sosylski F.W., Shook C.A. Matematikal simulation of a oilseed press. *Journal of the American Oil Chemists Society*. 1988, V. 65, pp. 1610–1616. DOI: 10.1007/BF02912564
2. Clef E.L., Kemper T. Sunflower seed preparation and oil extraction. In Martínez-Force E., Nurhan Turgut Dunford N.T., Salas J.J. (Eds.) Sunflower. Chemistry, Production, Processing, and Utilization unflower. Academic Press and AOCS Press. 2015. pp. 187–226. DOI: 10.1016/B978-1-893997-94-3.50014-3
3. Carre P. New Approach for the Elucidation of the phenomena involved in the operation of vegetable oil extraction presses. *OCL*. 2022, V. 29, article 6. DOI: 10.1051/ocl/2021048
4. Sitek W., Havran V. Mathematical model of the influence of geometric parameters of the shaft on the productivity of the screw press. *Engineering Review*. 2024, V. 44, Is. 1, pp. 125–135. DOI: 10.30765/er.2415
5. Savoie R., Lanoiselle J.-L., Vorobiev E. Mechanical continuous oil expression from oilseeds: A review. *Food Bioprocess Technol*. 2013, V. 6, no. 1, pp. 1–16. DOI: 10.1007/s11947-012-0947-x
6. Homann Th., Knuth M., Stein W. Das VPEX® –Verfahren – ein vereinfachtes Ölgewinnungsverfahren Vergleich mit anderen Verfahren, erste Betriebsergebnisse, Optimierungsmöglichkeiten. *Wiley*. 1981, V. 83, Is. S1, pp. 570–573. DOI: 10.1002/lipi.19810831317
7. Толчинский Ю.А., Ключкин В.В., Геращенко В.Н. Экструдеры и двухфазные среды. СПб.: Масложирпром, 1992. 576 с.
8. Гукасян А.В., Шилько Д.А. Построение инженерной модели процесса прессования растительных масел с учетом гидродинамики винтовых потоков // Вестник Керченского государственного морского технологического университета. 2020. № 3. С. 39–56. DOI: 10.47404/2619-0605_2020_3_39
9. Мельник Г.Е., Старков И.А., Старков К.А., Лисицын Д.А. Основные положения совмещенного процесса разрушения масличного материала и отжима масла в маслопрессе // Вестник Всероссийского научно-исследовательского института жиров. 2024. № 1-2. С. 32–37. DOI: 10.25812/VNIIG.2024.65.18.005
10. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. В 10 т. Т. 6. Гидродинамика. М.: Физматлит. 2021. 728 с.

11. Ульев Л.М. особенности напорно-расходной характеристики при неизотермическом течении высоковязких жидкостей в круглых конфузорах. Метод исследования // Вестник ХГПУ. 1998. № 15. С. 2–13.
12. Луцкич В.Г., Макарова М.С., Медвецкая Н.В., Решмин А.И. Численное исследование течения и теплообмена в плоских каналах переменного сечения // Тепловые процессы в технике. 2019. Т. 11. № 9. С. 386–394.
13. Луцкич В.Г., Макарова М.С., Решмин А.И. Ламинаризация потока при течении с теплообменом в плоском канале с конфузуром // Изв. РАН. МЖГ. 2019. № 1. С. 68–77. DOI: 10.1134/S0568528119010092
14. Качанов И.В., Жук А.Н., Шаталов И.М., Веремениук В.В., Филипчик А.В. Расчет оптимального угла конусности конфузора, используемого для реверсивно-струйной очистки металлических поверхностей от коррозии // Наука и техника. 2019. Т. 18. № 3. С. 216–222. DOI: 10.21122/2227-1031-2019-18-3-216-222
15. Старков И.А., Мельник Г.Е., Старков К.А., Лисицын Д.А. Моделирование производительности маслопресса для течения неньютоновской жидкости // Вестник Всероссийского научно-исследовательского института жиров. 2024. № 1-2. С. 43–48. DOI: 10.812/VNIIG.2024.33.31.006
16. Ходаков Г.С. Физико-химическая механика технологических процессов обработки материалов // Российский химический журнал. 2000. Т. XLIV. № 3. С. 93–107.
17. Курсанов Е.А., Матвеев В.Н. Вязкость и упругость структурированных жидкостей. М.: Техносфера. 2022. 284 с.
18. Мельник Г.Е., Старков И.А., Старков К.А., Лисицын Д.А. Численный расчет распределения давления и скоростей при течении материала в канале шнеков маслопресса // Вестник Всероссийского научно-исследовательского института жиров. 2024. № 1-2. 38–42. DOI: 10.25812/VNIIG.2024.21.80.016
19. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. В 10 т. Т. 7. Теория упругости. М.: Физматлит. 2007. 264 с.

References

1. Vadke V.S., Sosylski F.W., Shook C.A. Matematikal simulation of a oilseed press. *Journal of the American Oil Chemists Society*. 1988, V. 65, pp. 1610–1616. DOI: 10.1007/BF02912564
2. Clef E.L., Kemper T. Sunflower seed preparation and oil extraction. In Martínez-Force E., Nurhan Turgut Dunford N.T., Salas J.J. (Eds.) Sunflower. Chemistry, Production, Processing, and Utilization unflower. Academic Press and AOCS Press. 2015. pp. 187–226. DOI: 10.1016/B978-1-893997-94-3.50014-3
3. Carre P. New Approach for the Elucidation of the phenomena involved in the operation of vegetable oil extraction presses. *OCL*. 2022, V. 29, article 6. DOI: 10.1051/ocl/2021048
4. Sitek W., Havran V. Mathematical model of the influence of geometric parameters of the shaft on the productivity of the screw press. *Engineering Review*. 2024, V. 44, Is. 1, pp. 125–135. DOI: 10.30765/er.2415
5. Savoie R., Lanoiselle J.-L., Vorobiev E. Mechanical continuous oil expression from oilseeds: A review. *Food Bioprocess Technol*. 2013, V. 6, no. 1, pp. 1–16. DOI: 10.1007/s11947-012-0947-x
6. Homann Th., Knuth M., Stein W. Das VPEX® –Verfahren – ein vereinfachtes Ölgewinnungsverfahren Vergleich mit anderen Verfahren, erste Betriebsergebnisse, Optimierungsmöglichkeiten. *Wiley*. 1981, V. 83, Is. S1, pp. 570–573. DOI: 10.1002/lipi.19810831317
7. Tolchinsky Yu.A., Klyuchkin V.V., Gerashchenko V.N. Extruders and two-phase media. St. Petersburg, Maslozhirprom Publ., 1992. 576 p. (In Russian)
8. Gukasyan A.V., Shilko D.A. Construction of an engineering model of the pressing process of vegetable oils taking into account the hydrodynamics of screw flows. *Bulletin of the Kerch State Marine Technological University*. 2020, no. 3, pp. 39–56. DOI: 10.47404/2619-0605_2020_3_39. (In Russian)
9. Melnik G.E., Starkov I.A., Starkov K.A., Lisitsyn D.A. The main provisions of the combined process of oilseed material destruction and oil extraction in an oil press. *Bulletin of the All-Russian Scientific Research Institute of Fats*. 2024, no. 1-2, pp. 32–37. DOI: 10.25812/VNIIG.2024.65.18.005. (In Russian)
10. Landau L.D., Lifshits E.M. *Theoretical Physics*. 10 V. In Pitaevskiy L.P. (Ed.) Hydrodynamics. 6 V. Moscow, Fizmatlit Publ., 2021. 728 p. (In Russian)
11. Ulev L.M. Features of pressure-flow characteristics in non-isothermal flow of highly viscous liquids in round confusers. The research method. *Bulletin of KHSPU*. 1998, Is. 15, pp. 2–13. (In Russian)
12. Lusichik V.G., Makarova M.S., Medvetskaya N.V., Reshmin A.I. Numerical investigation of flow and heat transfer in plane channels of variable section. *Thermal Processes in Engineering*. 2019, V. 11, no. 9, pp. 386–394. (In Russian)
13. Lusichik V.G., Makarova M.S., Reshmin A.I. Laminarization of flow with heat transfer in a plane channel with a confuser. *Fluid Dynamics*. 2019, V. 54, no. 1, pp. 67–76. DOI: 10.1134/S0015462819010099
14. Kachanov I.V., Zhuk A.N., Shatalov I.M., Veremenyuk V.V., Filipchik A.V. Calculation of the optimal taper angle of a confuser used for reverse-jet cleaning of metal surfaces from corrosion. *Science and Technology*. 2019. V. 18, no. 3, pp. 216–222. DOI: 10.21122/2227-1031-2019-18-3-216-222 (In Russian)
15. Starkov I.A., Melnik G.E., Starkov K.A., Lisitsyn D.A. Modeling of oil press performance for non-Newtonian fluid Flow. *Bulletin of the All-Russian Scientific Research Institute of Fats*. 2024, no. 1-2, pp. 43–48. DOI: 10.812/VNIIG.2024.33.31.006. (In Russian)
16. Khodakov G.S. Physico-chemical mechanics of technological processes of materials processing. *Russian Chemical Journal*. 2000, V. XLIV, no. 3, pp. 93–107. (In Russian)

17. Kirsanov E.A., Matveenko V.N. *Viscosity and elasticity of structured liquids*. Moscow, Technosphere Publ., 2022. 284 p. (*In Russian*)
18. Melnik G.E., Starkov I.A., Starkov K.A., Lisitsyn D.A. Numerical calculation of pressure and velocity distribution during material flow in the channel of oil press screws. *Bulletin of the All-Russian Scientific Research Institute of Fats*. 2024, no. 1-2, pp. 38–42. DOI: 10.25812/VNIIG.2024.21.80.016 (*In Russian*)
19. Landau L.D., Lifshits E.M. *Theoretical Physics*. 10 V. In Pitaevskiy L.P. (Ed.) *Theory of Elasticity*. 7 V. Moscow, Fizmatlit Publ., 2007. 264 p. (*In Russian*)

Информация об авторах

Иван Александрович Старков – канд. физ.-мат. наук, ведущий специалист

Геннадий Ефимович Мельник – канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник

Александр Сергеевич Старков – канд. физ.-мат. наук, доцент факультета систем управления и робототехники

Дмитрий Александрович Лисицын – младший научный сотрудник

Information about the authors

Ivan A. Starkov, Ph. D., Principal Specialist

Gennady E. Melnik, Ph. D., Principal Researcher

Alexander S. Starkov, Ph. D., Associate Professor of the Department of Control Systems and Robotics

Dmitry A. Lisitsyn, Junior Researcher

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflicts of interests

Статья поступила в редакцию 17.06.2025

Одобрена после рецензирования 26.08.2025

Принята к публикации 30.08.2025

The article was submitted 17.06.2025

Approved after reviewing 26.08.2025

Accepted for publication 30.08.2025