



**В.А.Виноградов, д. т. н., нач. отдела технологического оборудования**  
Национальный институт винограда и вина «Магарач»

## ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ТЕОРИИ ПОДОБИЯ И РАЗМЕРНОСТЕЙ ПРИ ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОМ МОДЕЛИРОВАНИИ ПРОЦЕССОВ И ОБОРУДОВАНИЯ В ВИНОДЕЛЬЧЕСКОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

Изучение процессов, протекающих в машинах и аппаратах винодельческого производства, как правило, имеет целью решение двух основных научно-практических задач: установление оптимальных величин параметров, участвующих в процессе и вывод уравнений связи определяющих параметров (производительность, потребляемая мощность привода и др.) машины или аппарата с геометрическими и режимными характеристиками рабочих органов, а также показателями, учитывающими влияние физических, физико-механических и структурно-механических свойств перерабатываемого продукта. Такие уравнения обеспечивают возможность обоснованного выбора параметров оборудования различных типоразмерных групп. Это особенно важно в винодельческом производстве, где при создании новых объектов техники обычно разрабатывается не единичный образец, а их серия, соответствующая принятому параметрическому ряду.

Задачи, связанные с оптимизацией параметров рабочих органов машин и аппаратов, успешно решаются на основе обработки результатов прямых опытов с использованием методов математического моделирования, планирования эксперимента, применения численных методов анализа.

Вывод уравнений связи представляет собой значительно более сложную задачу, точное решение которой возможно только на основе использования аналитических методов. Эти методы дают исходную интерпретацию явлений в форме дифференциальных уравнений, устанавливающих взаимосвязи между факторами. Решение уравнений в виде зависимостей между конечными величинами обычно не достигается из-за сложности задачи. Поэтому чисто аналитическое исследование в рассматриваемой области, по выражению А.А.Гухмана [1], является «лишь принципиальной возможностью», которую трудно реализовать и довести до практического инженерного решения». Задача ещё больше усложняется не изученностью структурно-механических свойств винодельческих сред, их лабильностью и варьированием в очень широких пределах.

Общие закономерности изучаемых процессов или явлений позволяют раскрыть экспериментальные исследования, основанные на использовании методов подобия [1–6]. Один из указанных методов – анализ уравнений – позволяет, не решая дифференциальных уравнений, описывающих процесс, найти определённые соотношения основных параметров в виде безразмерных критериев подобия и рассматривать эти критерии как новые обобщенные переменные, которые выражают совокупное влия-

*О применении теории подобия и размерностей при исследовании и разработке нового технологического оборудования для виноделия.*

**Ключевые слова:** уравнение связи, метод анализа размерностей, физическое моделирование, сетчатый фильтр.

ние факторов на процесс. При таком рассмотрении задачи в новых переменных исследуется не единичный частный случай, а бесконечное множество различных случаев, объединённых некоторой общностью свойств. Согласно третьей теореме подобия: «Подобны те явления или системы, которые описываются одинаковыми уравнениями связи и условия однозначности которых подобны» [3]. Подобие условий однозначности обеспечивается равенством определяющих критериев подобия в случае, если процессы или явления качественно аналогичны. Таковыми являются процессы и явления, математическое описание которых одинаково.

Теория подобия объединяет сильные стороны аналитического и экспериментального моделирования. Она приводит к экспериментальному решению, основой которого являются физические законы в виде исходных уравнений процесса, причём переход к обобщённому переменным существенно облегчает и ускоряет это решение.

При исследовании и выборе параметров машин и аппаратов для виноделия в подавляющем большинстве случаев ещё не удаётся составить полные математические описания протекающих в них процессов в виде системы соответствующих дифференциальных уравнений. Например, процесс отделения виноградного сока в стекателе К1-ВСН-20 может приближённо рассматриваться как перемещение потока раздавленной виноградной массы (мезги) с переменным расходом вдоль пути. Решения подобных задач являются чрезвычайно сложными. Поэтому на современном этапе возможно лишь в самом общем виде представить взаимосвязь между физическими величинами и параметрами, характеризующими процесс. Вид такой зависимости может быть найден на основе использования метода размерностей [6–9]. Метод позволяет для любого исследуемого процесса представить общую функциональную зависимость между характеристиками и параметрами в виде уравнения связи строго определённого числа безразмерных комплексов. Поскольку степенная или логарифмическая зависимости чаще других определяют многие процессы физического характера, результаты опытов, проведённых с использованием анализа размерностей, могут быть представлены в виде степенных одночленов.

Плодотворность метода анализа размерностей подтверждается тем, что он

успешно применён в исследованиях оборудования, предназначенного для выполнения подобных (близких по механике процессов) технологических задач в других отраслях народного хозяйства: химической технологии, теплоэнергетике, строительстве, лёгкой промышленности, сельско-хозяйственной механике и др. [8, 10–14].

Применение методов теории подобия и анализа размерностей предполагает возможность определять оптимальные параметры новых образцов оборудования по результатам опытов с их уменьшенными моделями, обладающими физическим подобием. Если оно осуществлено, то по характеристикам модели путём пересчёта через масштабные коэффициенты можно получить величины всех параметров разрабатываемого натурального образца. Этот приём использован Л.Л. Гельгаром при исследованиях и разработке шнековых прессов [15] и В.П. Тихоновым – при разработке новых конструкций шнековых стекателей [16]. Однако довольно часто при применении уменьшенной модели механическое подобие процессов, протекающих на модели и в натурном образце, можно сохранить только при условии, если с изменением размеров соответственно изменять физические и структурно-механические свойства перерабатываемого продукта. Например, при сильно уменьшенной модели гребнеотделяющего устройства необходимо экспериментировать на специально отобранных мелких гроздях или на долях гроздей. При этом возникают довольно сложные проблемы с обеспечением заданной подачи виноградной массы в модель. Задача моделирования становится очень сложной, повышается трудоёмкость работы, возникают трудности проведения измерений с заданной точностью, усложняется требование поддержания стабильности режима процесса. С другой стороны, стоимость уменьшенной модели далеко не всегда ниже стоимости натурального образца, в особенности, если модель изготавливается в условиях недостаточного оснащённых, полукустарных механических мастерских.

Таким образом, как показал опыт, разработку параметров нового оборудования во многих случаях целесообразнее осуществлять не на уменьшенной модели, а на экспериментальном образце серии, выполняющем роль производственной стендовой установки. Экспериментальный образец по своим размерам и производитель-



ности должен быть близок к натурному. При таком подходе подобие сохраняется без ответственного изменения свойств перерабатываемого продукта, а достоверность полученных данных возрастает. Если исследования проводятся на одинаковом натурном сырье, физическое моделирование выводится в геометрическое и необходимо выдерживать условия подобия как сочетание подобия кинематического и материального [13, 14]. Экспериментальный образец может быть включён непосредственно в состав действующей на винзаводе поточной линии, что упрощает проведение исследований и повышает надёжность получаемых результатов.

Значительно сократить объём экспериментальной работы с более глубоким раскрытием физической сущности исследуемого процесса позволяет сочетание анализа размерностей с методами теории планирования эксперимента – метод комбинированного планирования [17]. Основная идея такого сочетания заключается в том, что матрица плана эксперимента формируется таким образом, чтобы в качестве независимых переменных рассматривались определяющие изучаемый процесс безразмерные комплексы. В результате получают математическую модель объекта исследования в виде уравнения регрессии первого или второго порядка, включающего (после соответствующего анализа модели) только главные факторы, которые и определяют эффективность изучаемого процесса.

Методы физического моделирования как средства инженерного анализа, базирующиеся на принципах теории подобия и анализа размерностей, ещё не получили своего завершения и продолжают совершенствоваться. В последнее время разработаны теоретические основы приближённого физического моделирования, при котором соответствие между моделью и образцом определяется эквивалентностью или подобием по отношению к прогнозируемой функции. Новая постановка проблемы приближённого физического моделирования позволила применять его для решения задач, относящихся к процессам в многофазных средах.

В винодельческой механике методы теории подобия и размерностей, физическое моделирование ещё не получили необходимого развития. Работы в этом направлении выполнены И.В. Крючковым с соавторами или под его руководством [18–22] в процессе теоретической разработки методов моделирования шнековых прессов для переработки яблок, а также В.Д. Емельяновым при разработке методов моделирования валковых дробилок, бичевых и лопастных гребнеотделяющих устройств [23]. При применении указанных методов в этой области серьёзные трудности возникают в связи с необходимостью моделирования свойств объектов механической обработки (винограда, мезги, гребней и др.). Кроме того, основным показателем работы винодельческого оборудования является качество получаемого продукта, а его очень трудно воспроизвести при моделировании. Большой интерес в этой связи представляет приближённое моделирование, при котором некоторые факторы, имеющие несущественное или небольшое влияние на протекание изучаемого процесса, моделируются приближённо или совсем не моделируются.

Методы подобия и размерностей были

использованы при разработке сетчатых фильтров для очистки виноградного сула и яблочного сула от взвесей [24]. Процесс очистки сула от взвешенных частиц является сложным неустановившемся процессом, зависящим от целого ряда факторов, характеризующих как физико-механические свойства очищаемого продукта, так и параметры и режимы сетчатых фильтров.

Математическое описание процесса фильтрования сула через сетчатые перегородки в общей форме может быть описано уравнениями Навье-Стокса совместно с уравнениями неразрывности потока. Однако единого аналитического решения системы дифференциальных уравнений для общего случая гидродинамических задач до настоящего времени нет. Имеющиеся известные решения имеют частный характер и могут быть применены лишь к конкретным условиям [25, 26]. Упрощение модели процесса предварительного фильтрования через сетчатые перегородки позволяет получить упрощённое описание этого процесса. Для решения задачи математического описания процесса фильтрования через сетчатые перегородки находят применение методы физического моделирования. Модели таких процессов строятся на применении теории подобия и анализа размерностей [25, 27, 28], а их использование совместно с теорией планирования эксперимента значительно расширяют возможности практического применения этих методов.

Критериальное уравнение фильтрования жидкости через сетки, используемое в практике очистки сточных вод, имеет вид:

$$F(E_u; Re_c; F_r; H_o) = 0, \quad (1)$$

где  $E_u$  – критерий Эйлера;  $Re_c$  – критерий Рейнольдса;  $F_r$  – критерий Фруда;  $H_o$  – критерий гомотронности.

Эта зависимость описывает движение жидкости через сетки в самом общем виде [29]. Применительно к процессу очистки сула через сетчатые перегородки это уравнение можно упростить. Процесс фильтрования сула в данном случае характеризуется следующими факторами:  $\Delta p$  – потери напора на сетке, м;  $V_c$  – средняя скорость движения очищенного сула в отверстиях сетки, м/с;  $d$  – характерный линейный размер отверстий сетки, м;  $\mu$  – коэффициент динамической вязкости, кг/(м·с);  $\rho$  – плотность сула, кг/м<sup>3</sup>;  $f_{per}$  – частота регенерации сетчатой перегородки, с<sup>-1</sup>;  $g$  – ускорение силы тяжести, м/с<sup>2</sup>;  $B_n$  – массовая концентрация взвесей до очистки, г/дм<sup>3</sup>;  $B_k$  – массовая концентрация взвесей после очистки, г/дм<sup>3</sup>.

Зависимость потерь напора от остальных факторов процесса предварительного фильтрования на сетчатых фильтрах можно представить в следующем виде:

$$\Delta p = F(V_c, d, B_n, B_k, \mu, \rho, f_{per}, g). \quad (2)$$

За основные параметры данного процесса принимаем  $V_c$ ,  $d$ ,  $\rho$ . Правильность выбора данных параметров подтверждается тем фактом, что определитель, составленный из основных величин, не равен нулю

$$\begin{vmatrix} 0 & 1 & -1 \\ 1 & -3 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{vmatrix} = +1 \neq 0. \quad (3)$$

Применим  $\pi$  – теорему и метод анализа размерностей.

$$\text{Получаем} \quad \pi = F(1, 1, 1, \pi_1, \pi_2, \pi_3, \pi_4, \pi_5), \quad (4)$$

$$\pi = \Delta p / V_c^x \cdot d^y \cdot \rho^z \quad (5)$$

$$\pi_1 = B_n / V_c^{x_1} \cdot d^{y_1} \cdot \rho^{z_1} \quad (6)$$

$$\pi_2 = B_k / V_c^{x_2} \cdot d^{y_2} \cdot \rho^{z_2} \quad (7)$$

$$\pi_3 = \mu / V_c^{x_3} \cdot d^{y_3} \cdot \rho^{z_3} \quad (8)$$

$$\pi_4 = f_{per} / V_c^{x_4} \cdot d^{y_4} \cdot \rho^{z_4} \quad (9)$$

$$\pi_5 = g / V_c^{x_5} \cdot d^{y_5} \cdot \rho^{z_5} \quad (10)$$

Вместо массовой концентрации взвесей после очистки можно использовать показатель – степень очистки сула  $i_{оч}$ , которая является безразмерной величиной и определяется зависимостью:

$$i_{оч} = (B_n - B_k) / B_n. \quad (11)$$

Проведёнными ранее исследованиями установлено, что между степенью очистки и массовой концентрацией взвесей в суле до очистки наблюдается слабая связь (коэффициент корреляции  $r = 0,05$ ), поэтому степень очистки является более информативным показателем, характеризующим процесс предварительного фильтрования на сетчатом фильтре.

Используя данные табл., где приведены факторы и их размерности, определяем значения показателей степени. В результате имеем

$$\pi = \Delta p / V_c^2 \cdot \rho \quad (12)$$

$$\pi_1 = B_n / \rho \quad (13)$$

$$\pi_2 = (B_n / \rho - B_k / \rho) / (B_n / \rho) = i_{оч} \quad (14)$$

$$\pi_3 = \mu / V_c \cdot d \cdot \rho \quad (15)$$

$$\pi_4 = f_{per} \cdot d / V_c \quad (16)$$

$$\pi_5 = g \cdot d / V_c^2 \quad (17)$$

Таким образом, зависимость (4) примет вид

$$\frac{\Delta p}{\rho V_c^2} = F\left(\frac{B_n}{\rho}, i_{оч}, \frac{\mu}{V_c d \rho}, \frac{f_{per} d}{V_c}, \frac{g d}{V_c^2}\right). \quad (18)$$

или, учитывая, что большинство полученных соотношений – критерии, запишем уравнение (18) в критериальной форме

$$E_u = F\left(\frac{B_n}{\rho}, i_{оч}, Re_c, Fr, \frac{f_{per} d}{V_c}\right). \quad (19)$$

В критерии Фруда характерный линейный размер  $d$  для сетчатых перегородок составляет  $10^{-4}$ – $10^{-5}$  м, поэтому произведение  $g \cdot d$  стремится к очень малой величине, т.е. практически влияние критерия  $(g \cdot d) / V_c^2$  для гидродинамики фильтрования на сетчатых фильтрах незначительно и им можно пренебречь [30].

Тогда критериальная зависимость (19) примет вид:

$$E_u = F\left(\frac{B_n}{\rho}, i_{оч}, Re_c, \frac{f_{per} d}{V_c}\right). \quad (20)$$

Частные решения уравнения (20) имеют вид

$$E_u = A \cdot Re_c^a \quad (21)$$

$$E_u = C \cdot (B_n / \rho)^c \quad (22)$$

$$E_u = K \cdot i_{оч}^k \quad (23)$$

$$E_u = N \cdot (f_{per} \cdot d / V_c^2)^n \quad (24)$$

Для нахождения коэффициентов в частных уравнениях (21)–(24) были проведены экспериментальные исследования с использованием сетчатого фильтра со сменными фильтровальными перегородками. Проведение исследований по влиянию различных факторов на процесс грубого фильтрования на сетчатых фильтрах экономически и практически целесообразно проводить на небольших моделях. Поскольку целью процесса является удаление взвесей, на которое основное влияние оказывает размер отверстий сетчатой фильтровальной перегородки, то основным условием применения модели фильтровальной установки сетчатого фильтра является использование фильтровальных перегородок с реальными натуральными размерами отверстий, т.е. в данном случае метод геометрическо-



Таблица  
Размерности основных факторов процесса  
грубого фильтрования на сетчатых  
фильтрах

Наименование фактора	Обозначение	Формула размерности
Потери напора	$\Delta p$	$M L^{-1} T^{-2}$
Характерный линейный размер	$D$	$L$
Начальная концентрация взвесей	$B_n$	$M L^{-3}$
Средняя скорость суслу в отверстиях перегородки	$V_c$	$L T^{-1}$
Коэффициент динамической вязкости	$M$	$M L^{-1} T^{-2}$
Плотность суслу	$\rho$	$M L^{-3}$
Ускорение силы тяжести	$G$	$L T^{-2}$
Степень очистки	$i_{оч}$	–

го моделирования является частичным. Метод частичного геометрического моделирования успешно применялся при изучении процессов суслоотделения через перфорированные поверхности при разработке новых конструкций стекателей и прессов [15, 16]. Этот метод даёт возможность не только изучать кинематические и динамические характеристики проводимого процесса, но и учитывать качественные показатели получаемого продукта. Исходя из того положения, что процесс суслоотделения представляет такой же процесс фильтрования, только с учетом влияния фильтрующих свойств мезги и иных режимных и конструктивных факторов, для изучения процесса грубого фильтрования на сетчатых фильтрах был также выбран метод частичного геометрического моделирования. В.А. Жужиков [31] отмечает, что вопросы моделирования процессов фильтрования в настоящее время не являются достаточно ясными и подлежат дальнейшему изучению. Указывается, что в качестве модели фильтра может быть использован небольшой фильтр, в конструктивном отношении приближенный к производственному образцу. Для того, чтобы процесс фильтрования полностью воспроизводился на реальной модели, необходимо, чтобы модельная установка и условия работы на ней, удовлетворяли следующим требованиям [32]: на модели должно воспроизводиться то же давление, что и на реальном фильтре; направление движущей силы процесса фильтрования по отношению к гравитационной силе на модели и промышленном оборудовании должны быть одинаковыми; способы подачи суспензии на модель и реальный фильтр должны быть одинаковыми; модель должна обеспечивать возможность промывки в тех же условиях, что и на промышленном фильтре; регенерация фильтровальной поверхности перегородки модели и промышленного фильтра должны быть одинаковыми.

При исследовании процессов разделения систем «жидкость – твёрдое тело» на небольших моделях важное значение имеет вопрос о масштабном переходе [33]. В данном случае использование одних и тех же сетчатых фильтровальных перегородок как на модели, так и реальном фильтре гарантирует соблюдение равенства степеней очистки суслу. Уменьшение влияния масштаб-

ного фактора на второй параметр процесса – среднюю скорость фильтрования достигается отношением её значения к единице площади фильтровальной перегородки. Использование метода частичного геометрического моделирования процесса фильтрования суслу на сетчатых перегородках позволяет в кратчайшие сроки с наименьшими затратами установить оптимальные параметры данного процесса.

Для определения значений коэффициентов в частных уравнениях (21)–(24) использовался метод комбинированного планирования. Матрица плана эксперимента была составлена таким образом, чтобы в качестве независимых переменных были использованы определяющие изучаемый процесс безразмерные комплексы. В исследованиях использовали модель сетчатого фильтра со сменными фильтровальными перегородками. В опытах по установлению значений коэффициентов варьировали значениями начальной массовой концентрации взвесей в сусле (139,0–140,4 г/дм<sup>3</sup>), характерного линейного размера отверстий сетчатой перегородки (0,25–1,00 мм), частоты регенерации фильтровальной перегородки (0,27–1,70 с<sup>-1</sup>), напора суслу, подаваемого на сетчатую перегородку (2·10<sup>-3</sup>–20·10<sup>-3</sup> м<sup>3</sup>/м<sup>2</sup>·с). Живое сечение сменных сетчатых перегородок составляло 37%. В опытах использовалось виноградное сусло первой и прессовой фракций винограда сорта Ркацители технической стадии зрелости с массовой концентрацией сахаров 172 – 191 г/дм<sup>3</sup>.

Результаты обработки исследований позволили найти частные решения уравнения (20):

$$1) E_u = 18,0050 \cdot Re_c^{0,9590} \text{ при } B_n/\rho < 0,01289; \quad (25)$$

$$E_u = 2,3429 \cdot Re_c^{1,4011} \text{ при } 0,01289 < B_n/\rho < 0,05585; \quad (26)$$

$$E_u = 9,5655 \cdot Re_c^{1,1970} \text{ при } 0,05585 < B_n/\rho < 0,1024; \quad (27)$$

$$E_u = 16,9759 \cdot Re_c^{1,1223} \text{ при } 0,1024 < B_n/\rho < 0,1332; \quad (28)$$

$$2) E_u = 1,0779 \cdot 10^8 (B_n/\rho)^{2,1770} \text{ при } d < 0,25 \text{ мм} \quad (29)$$

$$E_u = 0,1129 \cdot 10^8 (B_n/\rho)^{0,9503} \text{ при } 0,25 < d < 0,50 \text{ мм} \quad (30)$$

$$E_u = 0,0001683 \cdot 10^8 (B_n/\rho)^{0,5262} \text{ при } 0,5 < d < 0,8 \text{ мм} \quad (31)$$

$$E_u = 0,0004220 \cdot 10^8 B_n/\rho^{0,2820} \text{ при } d = 1,0 \text{ мм} \quad (32)$$

$$3) E_u = 3,0460 \cdot 10^8 i_{оч}^{1,9404} \quad (33)$$

$$4) E_u = 0,1316 \cdot 10^8 (f_{пер} \cdot d/V_c)^{2,8371} \quad (34)$$

Экспериментальные данные, полученные в результате исследований и представленные в виде  $E_u = \Delta p/\rho \cdot V_c^2$ , и рассчитанные по критериальным уравнениям показали, что расхождение результатов не превышает  $\pm 10\%$ . [34].

Полученная математическая модель и зависимости технологического процесса грубого фильтрования через сетчатые перегородки использованы при разработке новых конструкций сетчатых фильтров. Результаты исследований реализованы в разработанном и рекомендованном к серийному производству сетчатом фильтре марки Б2-ВФЛ [35].

Методы подобия и размерности должны стать в виноделии основой каждого научно поставленного эксперимента, поскольку они позволяют:

- при постановке эксперимента выбрать безразмерные комплексы физических ве-

личин, наиболее полно отражающие изучаемый процесс, а при обработке опытных данных распространять результаты единичных экспериментов на группы подобных явлений;

- не решая системы дифференциальных уравнений, описывающих процесс, найти соотношения основных величин в виде безразмерных комплексов (критериев подобия) и рассматривать последние как новые обобщённые переменные, которые выражают совокупное влияние отдельных факторов на процесс;

- экспериментально установить количественные соотношения (уравнения связи) между производительностью и энергоёмкостью машин и аппаратов и их конструктивными и кинематическими параметрами;

- в результате замены физических величин безразмерными комплексами (критериями подобия) сократить количество переменных, уменьшить объём экспериментальных и вычислительных работ, облегчить математическую обработку и др.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гухман А.А. Введение в теорию подобия. – Изд. 2-е перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 1973. – 295 с.
2. Теория подобия и размерностей. Моделирование / П.М. Алабуев, В.Б. Геронимус, Л.М. Минлевич, Б.А. Шеховцев. – М.: Высшая школа, 1968.
3. Баловнев В.И. Физическое моделирование ризания грунтов. – М.: Машиностроение, 1969. – 160 с.
4. Клайн Д.С. Подобие и приближённые методы. – М.: Мир, 1968. – 302 с.
5. Веников В.А. Теория подобия и моделирование. – Изд. 2-е доп. и перераб. – М.: Высшая школа, 1976. – 479 с.
6. Седов Л.И. Методы подобия и размерности в механике. – М.: Наука, 1981. – 447 с.
7. Бриджмен П.В. Анализ размерностей. – М.: ОНТИ, 1934.
8. Дидух Б.И., Каспэ И.Б. Практическое применение методов теории размерностей и подобия в инженерно-строительных расчётах. – М.: Стройиздат, 1975. – 48 с.
9. Хантли Г. Анализ размерностей. – М.: Мир, 1970.
10. Гуревич А.М., Груздев Ю.И. Применение методов подобия и размерностей при лабораторных исследованиях ведущих шин // Тракторы и сельхозмашины. – 1971. – №7.
11. Шебалкин А.Е. Обоснование параметров подающих устройств машин для внесения удобрений с применением методов физического моделирования и планирования экспериментов / Труды Всесоюзного ордена Трудового Красного Знамени НИИ механизации сельского хозяйства (ВИМ). – Т.87. – 1980. – С.156-162.
12. Батунер Л.М., Позин М.Е. Математические методы в химической технике. – 5-е изд. перер. и доп. – М.: Химия, 1968. – 824 с.
13. Баловнев В.И., Кравцов Э.А. Вопросы геометрического моделирования при изучении рабочих процессов землеройных машин // Известия вузов. Машиностроение. – 1967. – №4.
14. Баловнев В.И., Кравцов Э.А. Вопросы геометрического моделирования при резании снега рабочим оборудованием снегоуборочных машин // Известия вузов. Машиностроение. – 1970. – №3. – С.114-117.
15. Гельгар Л.Л. Исследование процессов пресования виноградной мезги и разработка новых винодельческих прессов: автореф. дис. на соискание учен. степени канд. техн. наук. спец. 05.175 «Машины и аппараты пищевой промышленности». – М., 1973. – 27 с.
16. Тихонов В.П. Совершенствование технологии получения суслу из виноградной мезги с использованием динамических стекателей: автореф. дис. к. т. н.: спец. 05.18.08 «Технология виноградных и плодово-ягодных напитков и вин». – Ялта, 1981. – 23 с.



17. Адлер Ю.П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.Б. – М.: Наука, 1976. – 280 с.
18. Крючков И.В. Основные закономерности непрерывного извлечения плодовых соков и разработка оборудования для поточных линий: автореф. дис. на соискание учен. степени докт. техн. наук: спец. 05.02.14 «Машины и агрегаты пищевой промышленности». – М., 1978. – 37 с.
19. Морозов А.Д. Исследование прессов с параллельными шнеками для переработки винограда: автореф. дис. на соискание учен. степени канд. техн. наук: спец. 05.175 «Машины и аппараты пищевой промышленности». – Одесса, 1972. – 24 с.
20. Корохов В.Г. Исследование шнековых прессов для переработки яблок: автореф. дис. на соискание учен. степени канд. техн. наук: спец. 05.02.14 «Машины и агрегаты пищевой промышленности». – К., 1974. – 22 с.
21. Крючков И.В. Геометрическое моделирование шнековых прессов / И.В. Крючков, А.Д. Морозов, Э.А. Кравцов // *Виноделие и виноградарство СССР*. – 1971. – №2. – С.48-50.
22. Крючков И.В. Определение наименьшего размера модели при физическом моделировании шнековых прессов / И.В. Крючков, Э.А.Кравцов, А.Д.Морозов // *Механизация и автоматизация производства*. – 1971. – №12. – С.20-21.
23. Емельянов В.Д. Научное обоснование параметров и разработка оборудования для дробления-гребнеотделения винограда: автореф. дис. на соискание учен. степени докт. техн. наук: спец. 05.18.12 «Процессы, машины и агрегаты пищевой промышленности». – Одесса, 1992. – 55 с.
24. Виноградов В.А. Научно-технические основы технологии производства суслу и виноматериалов: автореф. дис. на соискание учен. степени докт. техн. наук: спец. 05.18.05 «Технология сахаристых веществ и продуктов брожения». – Ялта, 2009. – 43 с.
25. Серпокрылов Н.С. Исследование особенностей технологического режима микрофильтров при выделении тринитрата целлюлозы из сточных вод: автореф. дис. на соискание учен. степени канд. техн. наук: спец. 05.23.04 «Водоснабжение и канализация». – Новочеркасск, 1979. – 22 с.
26. Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии. – М.: Химия, 1971. – 784 с.
27. Батунер М.М. Математические методы в химической технике / М.М. Батунер, М.Е. Позин. – Ленинград: Химия (Ленинградское отделение), 1968. – 824 с.
28. Андерсен К. Эффективность фильтров-сгустителей для осадка сока I сатурации // *Сахарная промышленность*. – 1978. – №6. – С.61-66.
29. Лейчкис И.М. Влияние дисперсности частиц примесей и скорости фильтрования на механизм очистки жидкостей/ И.М. Лейчкис, И.М. Федоткин // *Украинский химический журнал*. – 1977. – №2. – С.140-143.
30. Плешаков В.Д. Моделирование процесса микрофильтрации / В.Д. Плешаков, Н.С. Серпокрылов // *Тр. Новочеркасского ордена Трудового Красного Знамени политехнического института им. С. Орджоникидзе*. – Т. 289 «Исследования в области аналитической химии водных и неводных районов», 1974. – С. 15-17.
31. Жужииков В.А. Фильтрация / В.А. Жужииков. – М.: Химия, 1989. – 400 с.
32. Разделение суспензий в химической промышленности / [Малиновская Т.А., Кобринский И.А., Кирсанов О.С., Рейнфарт В.В.]. – М.: Химия, 1983. – 264 с.
33. Spear M. Filtering out the seiene from the art of separation processes/ M. Spear // *Process Eng.* – 1980. – Sept. – P.85, 87.
34. Виноградов В.А. Моделирование процесса фильтрования виноградного суслу на сетчатых фильтрах / В.А. Виноградов // *Виноградарство и виноделие*. Сб. научн. тр. НИВиВ «Магарач». – Т. XXXVII. – Ялта: НИВиВ «Магарач», 2007. – С.126-128.
35. Виноградов В.А. Сетчатый фильтр марки Б2-ВФЛ для очистки виноградного суслу от грубых взвесей / В.А. Виноградов, В.П. Тихонов, В.В. Кнышева // *Виноградарство и виноделие*. – 1994. – №1. – С.159-163.

Поступила 27.05.2013  
© В.А.Виноградов, 2013