

УДК 622.06:532.5.013.4

## ГРАВИТАЦИОННАЯ НЕУСТОЙЧИВОСТЬ ГАЗОЖИДКОСТНОГО ПОТОКА ПРИ ОСВОЕНИИ ГЕОТЕРМАЛЬНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Шулюпин Александр Николаевич,  
ans714@mail.ru

Институт горного дела ДВО РАН,  
Россия, 680000, г. Хабаровск, ул. Тургенева, 51.

**Актуальность** исследования обусловлена поиском путей повышения эффективности освоения геотермальных месторождений на основе обеспечения устойчивой работы системы добычи и транспортировки пароводяного теплоносителя.

**Цель:** определить природу и условия развития неустойчивости пароводяного течения в добычных скважинах и наземных трубопроводах при освоении геотермальных месторождений.

**Методы:** применение законов классической динамики к элементу движущейся среды с учетом особенностей газожидкостного течения; анализ условий возникновения и развития гравитационной неустойчивости пароводяного течения при освоении геотермальных месторождений.

**Результаты.** Описан один из механизмов, относящийся к макроскопической темпоральной неустойчивости газожидкостного потока, рассмотрены особенности его реализации в системах добычи и транспортировки двухфазного теплоносителя при освоении геотермальных месторождений. Возникновение неустойчивости связано со спонтанным изменением импульса потока, выраженного в изменении массового расхода, а ее развитие – с наличием условий, в которых изменение импульса движущейся среды приводит к сходному по знаку изменению силы, вызывающей движение. Отмечено, что неустойчивость Лединегга является одним из проявлений данного механизма, который также может реализовываться в связи с изменением гравитационной силы, действующий на поток, обусловленным изменением плотности газожидкостной смеси при изменении расхода. Рассмотрены особенности реализации данного механизма в пароводяной скважине при освоении геотермальных месторождений, установлена его связь с полной практически определяемых графиков производительности скважин. Сформулировано условие для проявления инверсии графиков производительности.

**Вывод.** Гравитационная неустойчивость течения в трубах вызывается спонтанным изменением импульса потока и связывается с наличием условий, в которых изменение импульса движущейся среды приводит к изменению силы, вызывающей движение, усиливающему изменение импульса. При этом эффективное развитие данной неустойчивости в восходящих потоках осуществляется вверх по потоку, в нисходящих потоках – вниз по потоку.

### Ключевые слова:

Геотермальное месторождение, газожидкостный поток, добычная скважина, пароводяная смесь, гравитационная неустойчивость, график производительности.

### Введение

Проблема гидродинамической неустойчивости хорошо известна и охватывает широкий спектр приложений в различных областях практической деятельности современного общества. Несмотря на множество работ, посвященных указанной проблеме, в настоящее время известно не так много механизмов, убедительно описывающих возникновение и развитие того или иного типа неустойчивости.

В связи с активным развитием мировой геотермальной энергетики [1, 2] у данной проблемы обозначились новые направления, связанные с обеспечением устойчивости работы системы добычи и транспортировки теплоносителя. В процессе эксплуатации добычные пароводяные скважины, являющиеся основным поставщиком теплоносителя в геотермальной энергетике, имеют склонность к самозадавлению – скважины с низким пластовым давлением, работающие за счет парлифта, в результате развития в них неустойчивости способны самопроизвольно прекратить работу. Это приводит как минимум ко временной потере теплоносителя и необходимости проведения новой, затратной процедуры стимулирования работы скважины [3], а как максимум – к невозможности ее дальнейшей эксплуатации. Отметим, что само-

задавливание добычных скважин является острой проблемой при разработке крупнейшего отечественного геотермального месторождения Мутновское (Камчатка) [4].

В работе [5] на примере пароводяного течения в добычной скважине и наземном трубопроводе, транспортирующем пароводяной геотермальный теплоноситель, исследован один из механизмов возникновения и развития неустойчивости двухфазного потока. При этом отмечено, что исследованный механизм является проявлением основного закона классической динамики (второго закона Ньютона) и может определяться гравитационным эффектом в двухфазном потоке. Учитывая, что некоторые аспекты данного механизма, без детального рассмотрения самого механизма, оказались актуальными при исследовании в других областях [6, 7], а гравитационному эффекту не уделяется должного внимания при классификации типов неустойчивости [8], представляется целесообразным более подробное рассмотрение его общих аспектов.

### Механизм возникновения и развития неустойчивости

Рассмотрим элемент потока, находящийся в канале постоянного сечения и занимающий длину  $L$  (рис. 1). Применим к данному элементу второй закон Ньютона с учетом одномерности течения вдоль оси канала

$$d(mv)/dt = (p_1 - p_2)S - F_f - F_g, \quad (1)$$

где  $(mv)$  – импульс выделенного элемента;  $p_1$  – внешнее давление на сечение со стороны вверх по потоку (на входное сечение элемента);  $p_2$  – внешнее давление на сечение со стороны вниз по потоку (на выходное сечение элемента);  $S$  – площадь поперечного сечения канала;  $F_f$  – сила трения;  $F_g$  – массовая (гравитационная) сила.

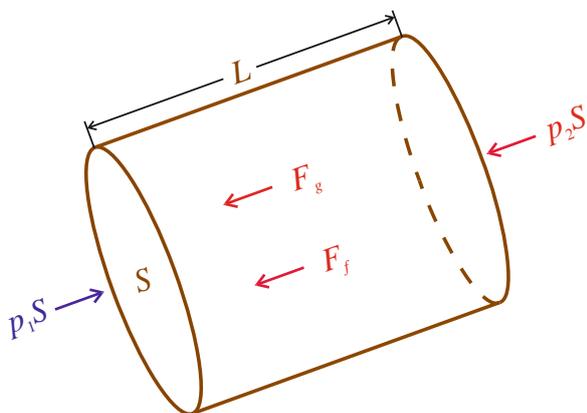


Рис. 1. Элемент канала течения и действующие на него силы

Fig. 1. Flow channel element and forces acting on it

Перейдем в уравнении (1) к частным производным, обозначая конвективную часть изменения импульса как силу инерции,

$$\partial(mv)/\partial t = (p_1 - p_2)S - F_f - F_g - F_c, \quad (2)$$

где  $F_c$  – сила инерции, связанная с конвективным изменением импульса.

Выразим импульс выделенного элемента через массовый расход

$$(mv) = GL, \quad (3)$$

где  $G$  – массовый расход;  $L$  – длина выделенного элемента.

Принимая во внимание неизменность длины элемента при взятии частной производной по времени, из (2) с учетом (3) получим

$$L\partial G/\partial t = (p_1 - p_2)S - F_f - F_c - F_g. \quad (4)$$

Особенностью уравнения (4) является то, что правая часть, выражающая действующую на элемент суммарную силу, зависит от расхода, изменение которого в явном виде содержится в левой части, выражающей нестационарное изменение импульса. Если возмущение в виде спонтанного увеличения массового расхода, т. е. увеличения импульса, приведет к увеличению суммарной силы, вызывающей движение, такая реакция вызовет еще большее увеличение расхода, следовательно, возмущение будет усиливаться и устойчивость течения будет нарушена. Но если такое возмущение будет приводить к снижению суммарной силы, его развития не будет, напротив, реакция силы будет способствовать подавлению начального возмущения, т. е. течение будет обладать устойчивостью к возмущению. К аналогичному выводу о том, что условием устойчивости является отличие знака в ре-

акции внешней силы на изменение расхода, можно прийти, анализируя возмущение в виде спонтанного снижения массового расхода (снижение расхода должно увеличивать внешнюю силу).

Таким образом, возникновение рассматриваемой неустойчивости связывается со спонтанным изменением импульса, выраженного в изменении расхода, а ее развитие – с реакцией сил, вызывающих движение, усиливающей данное возмущение. При этом формальное выражение условия устойчивости определяется как отрицательное значение частной производной суммарной внешней силы по расходу, а нарушение этого условия, допускающее существование частной производной импульса (левая часть (4)), – как условие для существования макроскопической неустойчивости, имеющей темпоральный характер. Следовательно, условие устойчивости приобретает вид

$$\frac{\partial}{\partial G}((p_1 - p_2)S - F_f - F_c - F_g) < 0. \quad (5)$$

Введя обозначения

$$F_f + F_c + F_g = S\Delta p_{in},$$

$$p_1 - p_2 = \Delta p_{ex}, \quad (6)$$

где  $\Delta p_{in}$  – внутренний перепад давления, состоящий из перепадов давления на трение, конвективное ускорение и гравитацию;  $\Delta p_{ex}$  – внешний перепад давления, преобразуем (5) к виду

$$\frac{\partial \Delta p_{in}}{\partial G} > \frac{\partial \Delta p_{ex}}{\partial G}. \quad (7)$$

Соотношение (7) известно как условие, ассоциирующееся с неустойчивостью Ледингга [9, 10], проявляющейся в парогенерирующих, за счет подвода тепла, каналах. Для описания неустойчивости Ледингга традиционно используется феноменологический подход: увеличение расхода приводит к сокращению области двухфазного потока, создающего основные гидравлические сопротивления, что приводит к снижению общего перепада давления внутри канала, способствуя, при отсутствии достаточного компенсирующего внешнего действия, еще большему увеличению расхода. Таким образом, нарушение соотношения (7) определяет условия для развития неустойчивости.

Феноменологический подход и отсутствие темпоральных элементов в соотношении (7) определили отношение рассматриваемой неустойчивости к классу «статической» [11, 12]. Тем не менее природа этой неустойчивости, напротив, определяется возможностью появления темпорального элемента, т. е. по природе данную неустойчивость следует рассматривать как темпоральную макроскопическую, что позволит более широко подходить к анализу ее проявлений. Заметим, что динамическая природа подобной неустойчивости отмечена в [13], где с наличием некоторых неточностей выводятся аналоги уравнения (4) и соотношения (7).

Рассмотренный механизм возникновения и развития макроскопической темпоральной неустойчивости на практике не ограничивается неустойчивостью Ледингга, вызванной особенностями трения в парогенерирующих каналах. Подобная неустойчивость может развиваться также в связи с другими эффектами.

В работе [6] отмечена важность гравитационного эффекта в развитии неустойчивости в классическом варианте с подводом тепла к каналу течения, а в [5] на примере пароводяной геотермальной скважины показано, что рассмотренный механизм может наблюдаться в газожидкостном восходящем потоке и без подвода тепла к каналу течения и вызываться особенностью гравитационного эффекта (гравитационная неустойчивость).

#### **Гравитационная неустойчивость в восходящем газожидкостном потоке**

В восходящем потоке гравитационная сила, пропорциональная плотности среды, препятствует движению. Увеличение расхода способствует усилению турбулентности и более интенсивному перемешиванию потока, что в газожидкостной среде приводит к снижению коэффициента скольжения (отношения усредненных скоростей) фаз. Снижение коэффициента скольжения приводит к увеличению истинного объемного газосодержания, что в результате снижает плотность смеси и препятствующую движению гравитационную силу, т. е. способствует увеличению суммарной силы, вызывающей движение. При малых скоростях, соответственно малом влиянии трения и конвективного ускорения, данный эффект может приводить к отрицательному значению левой части условия (7), течение становится внутренне неустойчивым, его устойчивость может обеспечиваться только влиянием внешних давлений, выраженным правой частью (7) и определяемым условиями течения вверх и вниз по потоку от рассматриваемого элемента канала.

Применительно к геотермальной скважине, являющейся на практике вертикальной, иногда немного искривленной трубой длиной до 2 км и более, данный механизм имеет свою специфику. Трудно ожидать спонтанного изменения расхода сразу по всей длине канала. Логично предположить, что триггерами для развития неустойчивости являются флуктуации расхода, имеющие локальный характер, которые могут случаться как вблизи устья и забоя, так и в средней части скважины.

Поскольку рассматривается гравитационная природа неустойчивости, для скважины в целом основным моментом является реакция на флуктуации расхода общей массы смеси в ее стволе. Флуктуации расхода в средней части скважины не изменят общей массы смеси в ее стволе. Увеличение (или снижение) расхода на забое приведет к советуемому увеличению (или снижению) массы смеси. Только флуктуации на устье оказывают непосредственное влияние на развитие неустойчивости в скважине в целом – увеличение (или снижение) расхода снижает (или увеличивает) общую массу смеси, создавая условия для эффективного развития неустойчивости вверх по потоку, т. е. вглубь скважины. Таким образом гравитационная неустойчивость в восходящих потоках способна эффективно развиваться только вверх по потоку (вниз по рельефу).

Учитывая отмеченную особенность развития гравитационной неустойчивости, значительную глубину скважин и малую скорость распространения возмущений в пароводяном потоке [14], что предполагает наличие значительного интервала времени для достижения возмущением забоя, реакцию забойного давления не следует рассматривать как фактор, способный эффективно влиять на развитие неустойчивости в скважине. Исключение может быть сделано только для скважин с малой длиной участка двухфазного течения. С учетом этого и принимая во внимание выражение (6), для геотермальной скважины в целом, где под  $p_1$  и  $p_2$  понимается давление на забое и на устье, соответственно, условие устойчивости следует использовать в виде

$$\frac{\partial \Delta p_{in}}{\partial G} + \frac{\partial p_2}{\partial G} > 0, \quad (8)$$

при этом производную внешнего давления на выходное сечение элемента (устьевого давления) можно рассматривать как производную перепада давления в системе транспортировки добытого флюида от устья скважины.

Значительная длина канала для развития гравитационной неустойчивости в геотермальных скважинах обуславливает важность внутренней локальной неустойчивости, соответствующей условиям, когда левая часть (7) меньше нуля. Как отмечалось, в этом случае устойчивость может быть обеспечена правой частью данного условия, т. е. внешними по отношению к рассматриваемому элементу трубы условиями. Если рассматриваемый элемент сопряжен с аналогичными, также внутренне неустойчивыми элементами, то, очевидно, не будет необходимой внешней реакции для сдерживания развития неустойчивости. Следовательно, в данном локальном элементе может развиваться неустойчивость, влияя на структуру потока и вызывая проявления нестационарности, такие как пульсации параметров потока. Как показано в [15] область течения с внутренней неустойчивостью в скважинах может быть обширной, при этом как на забое, так и на устье течение может быть внутренне устойчивым. Заметим, что необходимые для развития неустойчивости в скважине возмущения и условия на устье могут создаваться как гидродинамическими процессами в области внутренней неустойчивости (перемещением проявлений нестационарности из соответствующих зон внутри скважины), так и теплофизическими процессами в области сопряжения скважины с питающим пластом.

Изложенные представления об устойчивости течения позволили объяснить ряд явлений, наблюдаемых при испытании и эксплуатации пароводяных геотермальных скважин и имеющих сложности в трактовке на основе ранее существовавших представлений [15]. В частности, дана трактовка таких явлений, как инверсия графиков производительности и неустойчивый режим работы при эксплуатации с устьевым давлением, входящим в диапазон устойчивой работы при испытаниях. Заметим, что рассмотренная гравитационная неустойчивость, имеющая важное значение для

процессов освоения высокопотенциальных геотермальных месторождений, не вписывается в принятую в настоящее время классификацию типов неустойчивости [8].

#### Инверсия графиков производительности пароводяных скважин

Наиболее ярким проявлением специфики пароводяной скважины является инверсия графиков производительности, которая ранее рассматривалась с привлечением численных расчетов по соответствующей математической модели пароводяного течения [15]. Учитывая возможные вопросы, связанные с погрешностью расчетов, представляется целесообразным рассмотреть инверсии в контексте данной неустойчивости без привлечения численных расчетов.

График производительности является важнейшей характеристикой скважины и отражает зависимость расхода скважины от устьевого давления. Опытное определение графиков производительности осуществляется непосредственно после строительства скважин и повторяется по мере необходимости в процессе эксплуатации. Для этого измеряется расход пароводяной смеси на некоторых ступенях устьевого давления при достижении на них стабилизации расхода (обычно время стабилизации составляет около суток).

Инверсия графиков производительности наблюдается не всегда, более того, не на всех месторождениях, по ряду причин, в том числе, вследствие того, что данное явление имеет место при малых расходах, часто не представляющих практический интерес и не попадающих в диапазон проводимых испытаний. Заметим, что некоторыми специалистами инверсия не признается вовсе и типовым считается график без инверсии [16].

Существование инверсии автором не подвергается сомнению, поскольку неоднократно приходилось сталкиваться с этим явлением в процессе испытания скважин. Обычно в начале испытаний скважина переводится на максимальный расход при полностью открытой запорной арматуре на расходомерной установке, производится замер расхода на первой ступени. Затем прикрывается задвижка на входе в расходомерную установку, возрастает устьевое давление, снижается расход, производится замер на следующей ступени, и так далее. Инверсия заключается в том, что в некоторый момент дальнейшее прикрытие задвижки на входе в расходомерную установку приводит не к росту, а снижению устьевого давления, т. е. снижение расхода наблюдается на фоне снижения устьевого давления. На рис. 2 для примера показан график производительности, полученный при непосредственном участии автора на одной из скважин Паужетского месторождения (Камчатка) по семи ступеням устьевого давления (семь измерений расхода).

График состоит из «типовой», верхней, нисходящей ветви при больших расходах и «нетиповой», нижней, восходящей ветви при малых расходах. Поскольку устьевое давление является разностью давления на забое, выступающего как внешнее давление на

входе ( $p_1$ ), и перепада давления в скважине, для нетиповой ветви с положительным тангенсом угла наклона и, следовательно, положительным знаком производной устьевого давления по расходу справедливо условие

$$\frac{\partial p_1}{\partial G} - \frac{\partial \Delta p_{in}}{\partial G} > 0. \quad (9)$$

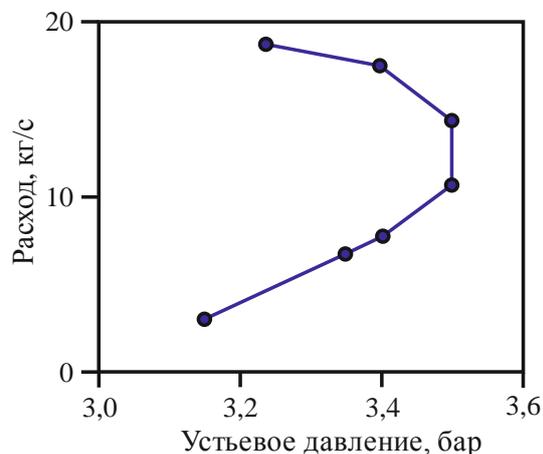


Рис. 2. График производительности скважины 108 Паужетского месторождения (испытание 2013 г.)

Fig. 2. Productivity curve of well 108 of the Pauzhetskoe field (2013 test)

Исключая гипотетические случаи, на практике первое слагаемое (9) всегда меньше нуля. Поэтому нетиповая ветвь может существовать только при отрицательном значении частной производной внутреннего перепада давления по расходу. С учетом этого из условия (8) следует, что устойчивая работа скважины на нетиповой ветви возможна лишь при наличии стабилизирующего эффекта, выраженного производной устьевого давления. Т. е. на нетиповой ветви устьевое давление не может быть постоянным абсолютно – для обеспечения устойчивости течения внешнее (со стороны системы транспортировки от скважины) устьевое давление должно соответствующим образом реагировать на изменение расхода, создавая стабилизирующий эффект.

Как отмечалось, обычно при испытаниях происходит дросселирование потока задвижкой на входе в расходомерную установку. Создаваемый при этом перепад давления на задвижке зависит от расхода, создавая стабилизирующий эффект. Если проводить испытания с действительно постоянным, не зависящим от расхода, устьевым давлением, то нетиповой ветви наблюдаться не будет. Более того, не будет наблюдаться часть типовой ветви. Действительно, при абсолютно постоянном устьевом давлении, согласно (8), устойчивое течение возможно лишь при положительном значении производной внутреннего перепада давления. В то же время для типовой ветви, учитывая отрицательный тангенс угла наклона, имеем

$$\frac{\partial p_1}{\partial G} - \frac{\partial \Delta p_{in}}{\partial G} < 0. \quad (10)$$

При отрицательном первом слагаемом условие (10) допускает не только положительное, но отрицательное значение производной внутреннего перепада давления. Таким образом, из типовой ветви выпадает часть графика, в которой производная внутреннего перепада находится в диапазоне

$$\frac{\partial p_1}{\partial G} < \frac{\partial \Delta p_{in}}{\partial G} < 0. \quad (11)$$

Именно этой, «потерянной», частью графика объясняется неустойчивый режим работы при эксплуатации с устьевым давлением, входящим в диапазон устойчивой работы при испытаниях, наблюдавшийся на некоторых скважинах Мутновского месторождения [15]. Испытания проводились при наличии стабилизирующего эффекта, вызванного дросселированием потока на задвижке перед расходомерной установкой, а эксплуатация осуществляется при относительно постоянном устьевом давлении, определяемом давлением в групповом (одном на несколько скважин) сепараторе. Первый случай допускает возможность отрицательного значения первого слагаемого условия устойчивости (8) в диапазоне (11), во втором случае такая возможность исключается, поскольку второе слагаемое (9) равно нулю.

Анализ условий (8) и (11) позволяет сформулировать общее условие устойчивой работы на нетиповой ветви графика производительности,

$$-\frac{\partial p_2}{\partial G} < \frac{\partial \Delta p_{in}}{\partial G} < \frac{\partial p_1}{\partial G}. \quad (12)$$

Если по каким-либо причинам в процессе опробования скважины не удастся обеспечить выполнение условия (12), инверсия наблюдаться не будет.

#### Гравитационная неустойчивость в нисходящем потоке

Около тридцати лет назад в мировой практике начала активно применяться транспортировка геотермального теплоносителя в двухфазном состоянии [17], достигшая в текущем веке широких масштабов [18, 19]. Двухфазная транспортировка принята в качестве основной при освоении Мутновского месторождения (Камчатка), которое обеспечивает теплоносителем две крупнейшие отечественные геотермальные электростанции, вырабатывающие более 80 % отечественной электроэнергии на геотермальных ресурсах. Наземные трубопроводы обладают широким спектром углов наклона относительно горизонтальной плоскости, имеют место как восходящие, так и нисходящие потоки. В том числе, на указанном месторождении имеются трубопроводы, транспортирующие смесь вниз по рельефу с перепадом высот более 100 м [20]. В этой связи представляется интересным изучение гравитационной неустойчивости не только в восходящих, но и в нисходящих потоках.

В нисходящих потоках, в отличие от восходящих, гравитация не противодействует, а способствует движению. Снижение плотности смеси при увеличении расхода не увеличивает суммарную движущую силу за счет гравитационного эффекта, как в восходящих потоках, а снижает ее. Проявление гравитационной не-

устойчивости в нисходящих потоках следует ожидать только в случае, когда при увеличении расхода плотность смеси возрастает, увеличивая суммарную движущую силу. Анализ особенностей газожидкостного течения показывает на возможность такого случая.

Известно, что в нисходящих потоках с малыми скоростями скорость жидкой фазы может превышать скорость газа. В этом случае увеличение расхода, усиливающее турбулентность и вызывающее перемешивание фаз, стремящееся выровнять их скорости, будет способствовать увеличению плотности смеси. Т. е. при малых скоростях течения теоретически могут существовать условия, в которых частная производная внутреннего перепада давления по расходу меньше нуля, и устойчивость, согласно условию (7) может обеспечиваться только за счет внешней реакции, а при ее отсутствии или недостаточности в потоке будет развиваться гравитационная неустойчивость.

Следует отметить еще одну особенность гравитационной неустойчивости в нисходящих потоках. Как было отмечено ранее, в восходящих потоках увеличение расхода на входе в трубу не снижает массу смеси в трубе в целом, что не способствует увеличению общей движущей силы, поэтому гравитационная неустойчивость эффективно развивается только от выхода ко входу. В нисходящих потоках, напротив, рост расхода на входе увеличивает массу смеси в трубе в целом, увеличивая общую движущую силу, а рост расхода на выходе снижает общую движущую силу. Таким образом, в нисходящих потоках эффективное развитие гравитационной неустойчивости осуществляется от входа к выходу.

Важно также подчеркнуть, что в одном трубопроводе, как правило, встречаются участки с различным наклоном. Поэтому для трубопровода актуально изучение внутренней и локальной, на отдельных участках, неустойчивости. В целом для локальных участков, имеющих небольшую длину, условие устойчивости будет определяться соотношением (7). Для протяженных нисходящих трубопроводов, с учетом отмеченной специфики (развитием вниз по потоку, что позволяет пренебречь производной давления на выходе), условие устойчивости следует использовать в виде

$$\frac{\partial \Delta p_{in}}{\partial G} - \frac{\partial p_1}{\partial G} > 0,$$

где в качестве давления на входе  $p_1$  в данном случае обычно выступает устьевое давление (давление на выходе из скважины или на входе в наземный трубопровод).

#### Выводы

1. Возникновение одного из механизмов неустойчивости течения в трубах связывается со спонтанным возмущением импульса потока, выраженного в изменении массового расхода. Развитие данной неустойчивости обусловлено наличием условий, в которых возмущение импульса движущейся среды приводит к изменению силы, вызывающей движение, усиливающему начальное возмущение.

2. Примерами проявления данного механизма являются известная неустойчивость Лединегга, обусловленная особенностями трения в парогенерирующих каналах, а также гравитационная неустойчивость газожидкостного потока в наклонных каналах, обусловленная изменением плотности смеси при изменении расхода.
  3. Полнота практического определения графиков производительности пароводяных скважин зависит от условий течения вниз по потоку от устья, включая специфику измерения расхода на различных ступенях давления, определяющих реакцию внешнего устьевого давления на изменение расхода. Для наблюдения инверсии графиков производительности необходимо выполнение условия (12).
  4. Устойчивая эксплуатация скважины без стабилизирующей реакции внешнего устьевого давления возможна не во всем диапазоне параметров, соответствующих устойчивой работе в процессе ее опробования при наличии указанной реакции.
  5. Эффективное развитие гравитационной неустойчивости для восходящих течений осуществляется вверх по потоку, в нисходящих течениях – вниз по потоку.
- Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-05-00161.*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bertani R. Geothermal power generation in the world 2010–2014 update report // *Geothermics*. – 2016. – V. 60. – P. 31–43.
2. Hutter G.W. Geothermal power generation in the world 2015–2020 update report // *Proceedings World Geothermal Congress 2020+1*. – Reykjavik, Iceland, 2021. – № 01017. – P. 1–17.
3. Mubarak M.H., Zarrouk S.J. Discharge stimulation of geothermal wells: Overview and analysis // *Geothermics*. – 2017. – V. 70. – P. 17–37.
4. Шулюпин А.Н., Любин А.А., Чернев И.И. Оценка эффективности парлифтной добычи флюида на Мутновском геотермальном месторождении (Камчатка) при разработке глубоких горизонтов // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2021. – Т. 332. – № 9. – С. 67–73.
5. Шулюпин А.Н. Неустойчивость течения в добычной скважине на месторождении парогидротерм // *Записки Горного института*. – 2016. – Т. 220. – С. 551–555.
6. Ma Z., Fang X. An overview of gravity effects on flow boiling instabilities // *Progress in Aerospace Sciences*. – 2022. – V. 128. – № 100764. – P. 1–26.
7. Su Y., Li X., Wu X. Theoretical analysis of Ledinegg instability and density wave oscillation using dimensionless numbers // *Applied Thermal Engineering*. – 2022. – V. 201. – № 117805. – P. 1–21.
8. O'Neill L.E., Mudawar I. Review of two-phase flow instabilities in macro- and micro-channel systems // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2020. – V. 157. – № 119738. – P. 1–43.
9. Ruspini L.C., Marcel C.P., Clausse A. Two-phase flow instabilities: a review // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2014. – V. 71. – P. 521–548.
10. Study on Ledinegg instability of two-phase boiling flow with bifurcation analysis and experimental verification / F. Liu, Z. Yang, B. Zhang, T. Li // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2020. – V. 147. – № 118954. – P. 1–15.
11. Boure J., Bergles A., Tong L. Review of two-phase flow instabilities // *Nucl. Eng. Des.* – 1973. – V. 25. – P. 165–192.
12. Nayak A.K., Vijayan P.K. Flow instabilities in boiling two-phase natural circulation systems: a review // *Science and Technology of Nuclear Installations*. – 2008. – ID 573192. – P. 1–15.
13. Non-linear analysis of nitrogen pressure drop instability in micro/mini-channels / Y. Kuang, W. Wang, J. Miao, H. Zhang, X. Yu // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2020. – V. 147. – № 118953. – P. 1–13.
14. Фисенко В.В. Критические двухфазные потоки. – М.: Атомиздат, 1978. – 160 с.
15. Шулюпин А.Н. Устойчивость режима работы пароводяной скважины. – Хабаровск: ООО «Амурпринт», 2018. – 136 с.
16. March A. Modelling a geothermal steam fields to evaluate well capacities and assist operational decisions // *Proceedings World Geothermal Congress 2015*. – Melbourne, Australia, 2015. – № 25008. – P. 1–9.
17. Zhao H.D., Lee K.C., Freeston D.H. Geothermal two-phase flow in horizontal pipes // *Proceedings World Geothermal Congress 2000*. – Kyushu–Tohoku, 2000. – P. 3349–3353.
18. Thermal efficiency of the Los Humeros Geothermal Field fluid transportation network / A. Garcia-Gutierrez, J.I. Martinez-Estrella, R. Ovando-Castelar, A. Vazquez-Sandoval, C. Rosales-López // *Proceedings World Geothermal Congress 2015*. – Melbourne, Australia, 2015. – № 25007. – P. 1–6.
19. Rizaldy, Zarrouk S.J. Pressure drop in large diameter geothermal two-phase pipelines // *Proc. 38th New Zealand Geothermal Workshop*. – New Zealand, 2016. – P. 1–5.
20. Шулюпин А.Н., Варламова Н.Н. Определение истинного объемного паросодержания при гидравлическом расчете трубопроводов пароводяной геотермальной смеси // *Теплоэнергетика*. – 2021. – № 5. – С. 72–77.

*Поступила 26.05.2022 г.*

#### Информация об авторах

**Шулюпин А.Н.**, доктор технических наук, директор Института горного дела ДВО РАН.

UDC 622.06:532.5.013.4

## GRAVITATIONAL INSTABILITY OF GAS-LIQUID FLOW AT DEVELOPMENT OF GEOTHERMAL FIELDS

**Aleksandr N. Shulyupin,**  
ans714@mail.ru

<sup>1</sup> Mining Institute of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences,  
51, Turgenev street, Khabarovsk, 680000, Russia.

**The relevance** of the study is caused by the search for ways to increase the efficiency of the development of geothermal fields on the basis of ensuring the stable operation of the system for the production and transportation of steam-water fluid.

**Purpose:** to determine the nature and conditions for the development of instability of the steam-water flow in production wells and transport pipelines during the development of geothermal fields

**Methods:** application of the laws of classical dynamics to an element of a moving medium, taking into account the features of a gas-liquid flow; analysis of the conditions for the emergence and development of gravitational instability of the steam-water flow during the development of geothermal fields.

**Results.** One of the mechanisms related to the macroscopic temporal instability of a gas-liquid flow is described, and the features of its implementation in systems for the production and transportation of heat agent during the development of geothermal fields are considered. The emergence of instability is associated with a spontaneous change in the momentum of the flow, expressed in a change in the mass flow rate, its development is associated with the presence of conditions in which a change in the momentum of a moving medium leads to similar in sign change of moving force. It is noted that the Ledinegg instability is one of the manifestations of this mechanism, which can also be realized in connection with a change in the gravitational force acting on the flow, due to a change in the density of the gas-liquid mixture with a change in flow rate. The features of the implementation of this mechanism in a steam-water well during the development of geothermal fields are considered and its connection with the completeness of practically determined productivity curves of wells is established. A condition for the manifestation of inversion of productivity curves is formulated.

**Conclusion.** The gravitational instability of the flow in pipes is caused by a spontaneous change in the momentum of the flow and is associated with the presence of conditions in which a change in the momentum of the moving medium leads to a change in the force that causes the movement, which enhances the change in the momentum. In this case, the effective development of this instability in ascending flows is carried out upstream, in descending flows – downstream.

### Key words:

Geothermal field, gas-liquid flow, production well, steam-water mixture, gravitational instability, productivity curve.

The reported study was funded by RFBR, project number 20-05-00161 A.

### REFERENCES

- Bertani R. Geothermal power generation in the world 2010–2014 update report. *Geothermics*, 2016, vol. 60, pp. 31–43.
- Huttrer G.W. Geothermal Power Generation in the World 2015–2020 Update Report. *Proceedings World Geothermal Congress 2020+1*. Reykjavik, Iceland, 2021. No. 01017. pp. 1–17.
- Mubarak M.H., Zarrouk S.J. Discharge stimulation of geothermal wells: overview and analysis. *Geothermics*, 2017, vol. 70, pp. 17–37.
- Shulyupin A.N., Lyubin A.A., Chernev I.I. Assessment of the efficiency of steam-lite fluid production at the mutnovskoe geothermal field (Kamchatka) in the development of deep horizons. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 9, pp. 67–73. In Rus.
- Shulyupin A.N. Flow instability in producing well at flash-steam fields. *Zapiski Gornogo instituta*, 2016, vol. 220, pp. 551–555.
- Ma Z., Fang X. An overview of gravity effects on flow boiling instabilities. *Progress in Aerospace Sciences*, 2022, vol. 128, no. 100764, pp. 1–26.
- Su Y., Li X., Wu X. Theoretical analysis of Ledinegg instability and density wave oscillation using dimensionless numbers. *Applied Thermal Engineering*, 2022, vol. 201, no. 117805, pp. 1–21.
- O'Neill L.E., Mudawar I. Review of two-phase flow instabilities in macro- and micro-channel systems. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2020, vol. 157, no. 119738, pp. 1–43.
- Ruspini L.C., Marcel C.P., Clause A. Two-phase flow instabilities: a review. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2014, vol. 71, pp. 521–548.
- Liu F., Yang Z., Zhang B., Li T. Study on Ledinegg instability of two-phase boiling flow with bifurcation analysis and experimental verification. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2020, vol. 147, no. 118954, pp. 1–15.
- Boure J., Bergles A., Tong L. Review of two-phase flow instabilities. *Nucl. Eng. Des.*, 1973, vol. 25, pp. 165–192.
- Nayak A.K., Vijayan P.K. Flow instabilities in boiling two-phase natural circulation systems: a review. *Science and Technology of Nuclear Installations*, 2008, ID 573192, pp. 1–15.
- Kuang Y., Wang W., Miao J., Zhang H., Yu X. Non-linear analysis of nitrogen pressure drop instability in micro/mini-channels. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2020, vol. 147, no. 118953, pp. 1–13.
- Fisenko V.V. *Kriticheskie dvukhfaznye potoki* [Critical two-phase flows]. Moscow, Atomizdat Publ., 1978. 160 p.
- Shulyupin A.N. *Ustoichivost rezhima raboty parovodyanoi skvazhiny* [Stability of the steam-water well mode]. Khabarovsk, Amurprint LLC Publ., 2018. 136 p.
- March A. Modelling a geothermal steam fields to evaluate well capacities and assist operational decisions. *Proceedings World Geothermal Congress 2015*. Melbourne, Australia, 2015. No. 25008, pp. 1–9.
- Zhao H.D., Lee K.C., Freeston D.H. Geothermal two-phase flow in horizontal pipes. *Proceedings World Geothermal Congress 2000*. Kyushu-Tohoku, 2000. pp. 3349–3353.
- Garcia-Gutierrez A., Martinez-Estrella J.I., Ovando-Castelar R., Vazquez-Sandoval A., Rosales-López C. Thermal efficiency of the Los Humeros Geothermal Field fluid transportation network. *Proceedings World Geothermal Congress 2015*. Melbourne, Australia, 2015. no. 25007, pp. 1–6.
- Rizaldy, Zarrouk S.J. Pressure drop in large diameter geothermal two-phase pipelines. *Proc. 38th New Zealand Geothermal Workshop*. New Zealand, 2016. pp. 1–5.
- Shulyupin A.N., Varlamova N.N. Determining the void fraction in the hydraulic design of geothermal steam-water mixture piping. *Thermal Engineering*, 2021, vol. 68, no. 5, pp. 395–399.

Received: 26 May 2022.

### Information about the authors

**Aleksandr N. Shulyupin**, Dr. Sc., director, Mining Institute of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences.